

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**



Р.О. Дичковський, М.М. Табаченко, В.С. Фальштинський

**ЗМІНИ ГІРСЬКОГО МАСИВУ
ПРИ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ГЕОТЕХНОЛОГІЯХ
ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ**

Підручник

**Дніпропетровськ
НГУ
2015**

УДК 622.278

ББК 33.24

Д 44

Рекомендовано до видання вченою радою Державного вищого навчального закладу
«Національний гірничий університет» (протокол № 14 від 20.10.2015).

Рецензенти:

М.С. Четверик – д-р техн. наук, проф., завідувач відділу геомеханічних основ технології розробки родовищ (Інститут геотехнічної механіки НАН України, м. Дніпропетровськ);

В.І. Голінько – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри аерології та охорони праці (Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет»).

Дичковський Р.О.

Д44 Зміни гірського масиву при фізико-хімічних геотехнологіях газифікації вугілля : підручник / Р.О. Дичковський, М.М. Табаченко, В.С. Фальштинський; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ : НГУ, 2015. – 160 с.

ISBN 976-966-350-564-0

Охарактеризовано геотехнологічні методи видобутку корисних копалин. Розглянуто основи термодинамічних процесів підземної газифікації вугільних пластів, значну увагу спрямовано на способи розкриття, підготовку та системи відпрацювання вугільних пластів при газифікації, методи розрахунку основних технологічних параметрів, гірничо-фізичні явища, які відбуваються в бічних породах і пласті під дією високих температур і тиску. Містить дані про пружні, деформаційні, міцнісні, електромагнітні й метаморфічні властивості породи при високих температурах і тиску. Наведено відомості про методи розрахунку параметрів термодинамічних процесів у гірських породах. Приділено увагу закономірностям прояву гірського тиску в зоні вогневих робіт. Описано метод побудови зон підвищеного тиску і кількісної оцінки напружень у гірських породах. Розглянуто екологічні аспекти технології газифікації вугільних пластів з повним закладанням вигазованого простору.

Призначено для студентів спеціальності 184 Гірництво. Може бути корисним викладачам і студентам гірничих, енергетичних та хіміко-технологічних вузів, також розраховано на інженерно-технічних працівників вугільної, теплоенергетичної та гірничо-хімічної галузей промисловості, науково-дослідних і проектних організацій.

УДК 622.278

ББК 33.24

© Р.О. Дичковський, М.М. Табаченко,
В.С. Фальштинський, 2015

© Державний вищий навчальний заклад
«Національний гірничий університет», 2015

ISBN 976-966-350-564-0

Вступ

У сучасний період тепло- і масообмін, агрегатні та фазові перетворення у мінералах і породах під час дії окислювально-відновлюваних процесів з виділенням чи поглинанням тепла є супутніми при різних технологічних процесах видобування і переробки корисних копалин. З розвитком геотехнологічних методів розробки родовищ і зростаючих вимог до якості гірничої сировини теплові процеси на разі будуть переходити з розряду супутніх у розряд технологічних. Вже тепер потрібна спеціальна інженерна підготовка в процесі вирішення питань використання тепла земних надр, теплообміну, фазових і агрегатних перетворень під час випалу окатишів і агломератів, підземній виплавці сірки і підземній газифікації твердого палива, термічного, електричного і комбінованого способів руйнування гірських порід під час буріння шпурів і свердловин, проведенні виробок, подрібненні, різанні та поверхневій обробці блочного каменю, безконтактному термодинамічному очищенні видобувного і транспортного обладнання від залипкої і намерзлої гірничої маси, відтанення промерзлих порід і багато іншого.

Характерною рисою розвитку сучасної економіки є підвищення народногосподарської цінності сировинних і природних ресурсів. Все більшого значення вони набувають у зв'язку з необхідністю надійного забезпечення промисловою сировиною.

Одним із найважливіших напрямів науково-технічного прогресу на цей час є запровадження прогресивних технологічних процесів видобутку корисних копалин, які дозволяють значно зменшити матеріальні та трудові витрати на виробництві, покращити кінцеві народногосподарські результати.

Найближчими роками дефіцит багатьох корисних копалин стане на порядок денний, тому все більше значення для майбутнього людства набуває вивчення й освоєння земних надр.

Трохи більше як за півстоліття гірнича справа сягнула від кайла і лопати до найпотужніших механізованих комплексів. Однак стрибок, який відбувся у гірничій справі, має більш кількісний, ніж якісний характер (рис.1).

Вже минулого сторіччя гірниче виробництво вступило у протиріччя з природою, бо з кожним роком для того щоб дістатись до корисної копалини, необхідно знищувати все більше насаджень, лісів і полонин.

Освоєння глибинних горизонтів шахт супроводжується явищами зростання температури, раптових викидів, погіршення умов і без того важкої підземної праці гірників. До цього ще необхідно додати, що навколо глибинних горизонтів родовищ, що знаходяться в роботі, утворюються депресійні воронки, які зневоднюють від підземних вод сільськогосподарські угіддя, що розташовані на десятках кілометрів від шахт і кар'єрів, порушуючи екологічну рівновагу цілих районів.

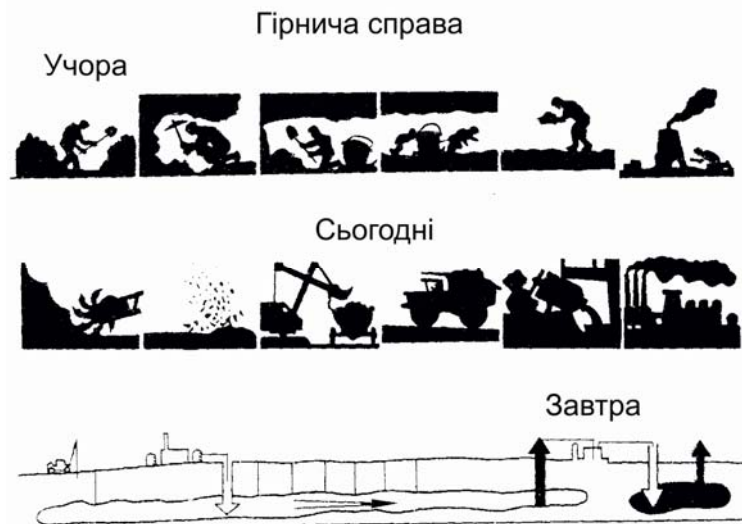


Рис. 1.1. Геотехнологія – майбутнє гірничої справи

Вже тепер експерти стверджують, що зростання питомої ваги відкритих розробок буде знижуватись через значні порушення поверхні Землі. Крім цього окрема увага приділятиметься відпрацюванню уже наявних, так званих, техногенних родовищ.

Традиційні (підземні та відкриті) способи розробки родовищ, які базуються на механічному відокремленні корисної копалини від масиву, навантаженні, доставці й транспорті гірничої маси, вимагають присутності людей на місці видобутку. Навіть у майбутньому повна автоматизація всіх операцій підземної розробки навряд чи відбудеться. Таким чином, ці методи не звільняють людей від важкої праці, вимагають відокремлення та переміщення мільйонів тонн пустих порід і переробки всієї гірничої маси.

Зараз практично всі принципові можливості удосконалення технологій відкритої і підземної розробки вичерпані. У той же час з кожним роком потреба у природній мінеральній сировині зростає і, щоб задовольнити її, в розробку втягуються все більше бідні родовища, які залягають на великих глибинах і в складних гірничо-геологічних умовах. На видобувних підприємствах постійно зростає собівартість продукції при одночасному зростанні капітальних вкладень.

Тому на сучасному етапі в гірничо-видобувній промисловості виникає необхідність докорінної перебудови технології видобування корисних копалин, заміна старих технічних засобів гірничого виробництва новими, які ґрунтуються цілком на інших принципах. А це, як відомо, означає необхідність науково-технічної революції у сфері гірничого виробництва, яка здебільшого пов'язана з розвитком нового у гірничій науці напрямку – геотехнології і використання її можливостей для розробки нових геотехнологічних методів видобутку.

Необхідність вирішення цих проблем призвела до створення прогресивної технології газифікації вугільних пластів.

Підземна газифікація вугілля – складний термомеханічний процес перетворення твердого палива на місці його залягання у газоподібний стан. Він

відбувається шляхом організації взаємодії вугілля, а точніше вуглецю, з газоподібним окислювачем (повітрям, киснем, водяною парою та їх сумішами), внаслідок чого органічна маса твердого палива перетворюється у горючий газ, який містить CO , H_2 , CH_4 . Такий газогенераторний газ призначається після виведення на земну поверхню або для одержання теплової енергії при подальшому спалюванні (енергетичний газ), або для виробництва різних хімічних продуктів (технологічний газ).

Мета підручника – викладення фізико-геологічних основ геотехнології як єдиного комплексу знань, необхідного гірникам і геологам для оцінки умов розробки родовищ геотехнологічними методами видобування.

Геотехнологія знаходиться на стику великої кількості наукових дисциплін і може слугувати одним із самих яскравих прикладів інтеграції наук.

Автори на основі аналізу відомого матеріалу, зібраного по літературних джерелах, і нових результатів досліджень, проведених у польових і лабораторних умовах, завдяки подібності об'єктів і методів їх досліджень виклали загальний підхід до вивчення фізико-геологічного стану гірських порід у термодинамічних умовах експлуатації.

1. Характеристика геотехнологічних методів розробки корисних копалин

Класифікація. Оскільки переведення корисної копалини в рухомий стан являє собою саму суть геотехнологічних методів, то їх перш за все і слід розрізняти за видами рухомих станів. Другою важливою ознакою є спосіб переведення корисної копалини в рухомий стан [1, 2].

Наведена в табл. 1.1 класифікація є досить загальною, бо охоплює всі принципово можливі геотехнологічні методи видобутку. Окрім розподілу методів за двома основними кваліфікаційними ознаками, можна розрізняти їх додатково за способами розкриття покладів, підготовки руд, інтенсифікації тощо. Однак всі ці ознаки є другорядними.

Таблиця 1.1

Рухомий стан корисної копалини	Способи переведення корисної копалини в рухомий стан			
	фізичні	хімічні	фізико-хімічні	мікро-біологічні
Газ	Вплив температури тиску (сублімація, перегонка)	Окислення, розкладання (часткове або повне спалювання, випал)	Хімічні реакції з участю фізичних полів	Бактеріальний вплив
Рідина	Плавлення, перегонка, вплив температури тиску	Вилуговування і розчинення з утворенням молекулярних розчинів	Гідрогенізація, розчинення і вилуговування з участю фізичних полів	Бактеріальне вилуговування
Рухомі механічні суміші	Гідропневмо-руйнування	Розчинення зв'язуючої речовини	Диспергування поверхнево-активними речовинами, хімічними реагентами і фізичними полями	Бактеріальне розчинення цементу (бактеріальний вплив)

Підземне розчинення (ПР). Видобування розсолів кам'яної солі через свердловини відоме з 12 – 14 віків. Промислова технологія ПР солей була запропонована Е.М. Треппом (США) у 1933 р. ПР калійних солей у промисловому масштабі освоєно в місцевості Саскічевань (Канада) тільки у 1964 р.

При ПР соляні поклади розкриваються свердловиною, яка обладнується концентрично розташованими вільнозавислими робочими колонами: водоподавальною і розсолозабірною (рис. 1.2). Розчинник (воду) подають у соляний поклад по кільцевому зазору між розсолозабірною і водоподавальною колонами.

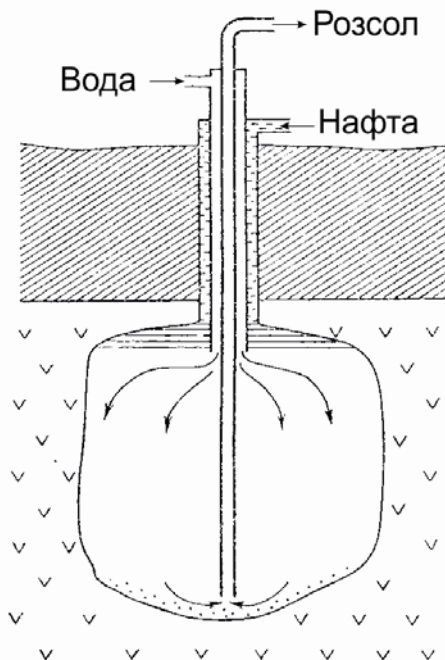


Рис.1.2. Принципова схема підземного розчинення солей

Для одержання розсолів промислової концентрації (305 – 310 г/л) відпрацювання продуктивної товщі відбувається в камерах ступінчастим методом знизу вгору. Під покрівлю камери подаються нерозчинник (нафта, керосин чи повітря), які запобігають розчиненню породи стелі. Розчинник, який нагнітають в камеру, легше від розсолу, що заповнює камеру. Тому він спливає під верхню частину камери і стикаючись з масивом солі поступово насичується й опускається до башмака розсоловидачної колони. Розсол під остаточним тиском витягується через розсолопідйомну колону на поверхню. Від свердловини по трубопроводах розсол направляється через контрольно-розподільчий пункт у резервуар кондиційного розсолу, звідки транспортується до споживача.

Швидкість розчинення можна визначити з відомого рівняння:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \gamma \cdot f(c_{\text{нас}} - c), \quad (1.1)$$

де $\frac{\partial c}{\partial t}$ – швидкість зміни концентрації розчину;

γ – коефіцієнт розчинення, який дорівнює $\frac{k}{\Delta}$,

k – коефіцієнт дифузії;

Δ – товщина дифузійного шару;

c – концентрація солі у розчині.

Процес вирівнювання складу відбувається під дією дифузії. Величина коефіцієнта дифузії оцінюється орієнтовно за формулою:

$$K = 10^{-5} \cdot \frac{14}{\alpha^{1,1} \cdot q^{0,6}}, \quad (1.2)$$

де α – в'язкість розчину;

q – молярний об'єм дифундуючої речовини (об'єм розчину даної концентрації, в якій міститься 1 моль розчиненої речовини).

З підвищенням температури на 1°C коефіцієнт дифузії зростає приблизно на 2,6 %. Таким чином, величина коефіцієнта дифузії залежить від складу розчину, його в'язкості та температури.

Розчини, які одержують методом ПР, є вихідною сировиною для одержання хлору, соди, харчової солі та інших продуктів. ПР використовується також для створення в соляних відкладах порожнин (ємностей) для сховищ нафтопродуктів і газів.

Підземне вилуговування (ПВ) корисних копалин використовується під час видобування кольорових і рідких металів, уранових руд, фосфатів тощо. Підземне вилуговування кольорових металів відомо з 16 століття (Іспанія), перше велике промислове освоєння метода пов'язано з видобуванням міді на рудниках у Мексиці (1924 р.) і з організацією ПВ на мідно-колчеданових родовищах Уралу (1939 – 1942 рр.) шляхом подачі розчинника у поклади з поверхні через свердловини (з 1957 р.). ПВ використовується у США, Росії, Франції, Німеччини, Японії і ін.

Вибір розчинника при ПВ залежить від складу руди і характеру хімічної сполуки, яка утворюється корисною копалиною. ПВ відноситься до фільтраційних процесів і базується на хімічних реакціях “тверде тіло – рідина”.

Під час ПВ проникних рудних тіл родовище розкривається системою свердловин, які розташовуються (у плані) рядами, багатокутниками, кільцями. До свердловин подають розчинник, який фільтруючись по пласту, вилуговує корисні компоненти. Продукційний розчин відкачують через сусідні свердловини. У разі монолітних непроникних рудних тіл поклад розкривають підземними гірничими виробками, окремі рудні блоки подрібнюють за допомогою буропідричних робіт. Далі на верхньому горизонті масив зрошують розчинником, який, стікаючи донизу, розчиняє мінерали корисної копалини. На нижньому горизонті шахти розчини збирають і перекачують на поверхню для переробки (рис.1.3).

Метод вилуговування металів широко використовується для видобутку міді й урану в США, Канаді, Японії й інших країнах.

Підземна виплавка широко використовується для видобування самородної сірки, бітуму, озокериту, асфальту, важкої нафти тощо. Особливо широке застосування одержала в світі підземна виплавка сірки. Технологія виплавлення основана на низькій ($112 - 119^\circ \text{C}$) температурі плавлення елементарної сірки, майже вдвічі більшій ніж у води щільності (1800 н/м^3), порівняно низькій в'язкості у рідинній фазі $(7 - 10) \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$ у робочому інтервалі температур $120 - 150^\circ \text{C}$.

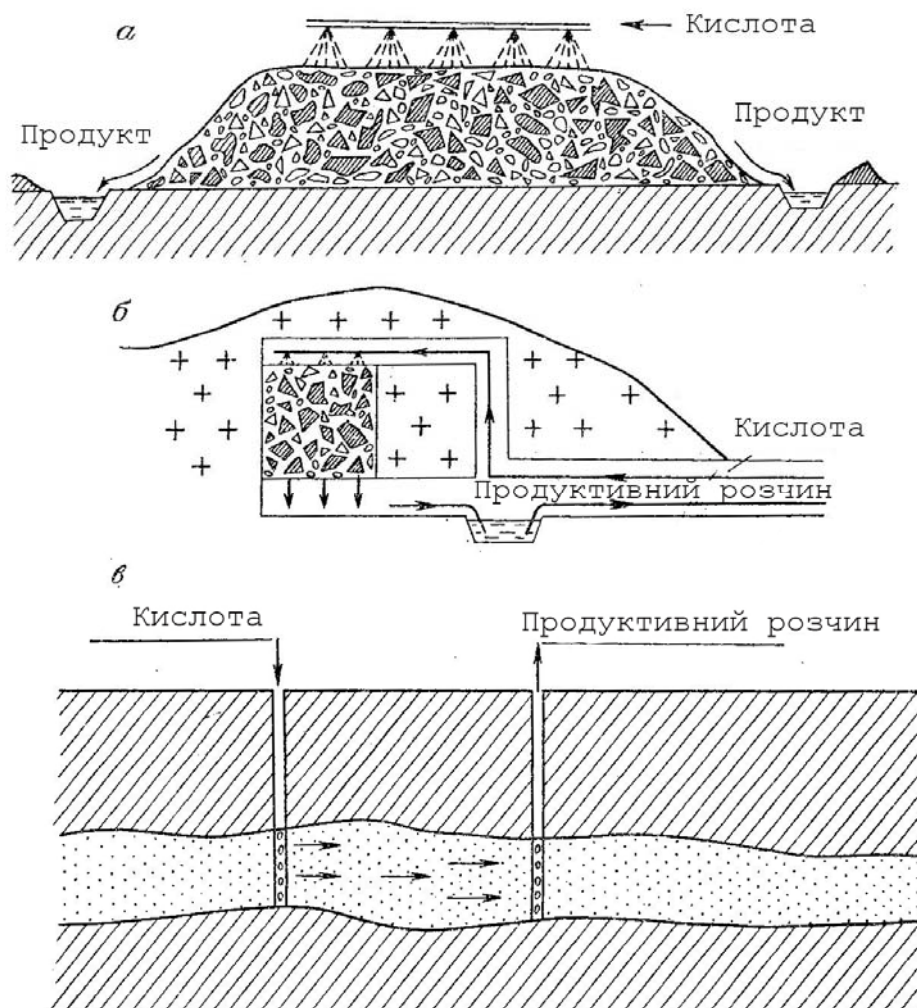


Рис.1.3. Принципова технологічна схема вилуговування металів:
 а – поверхнєве (кучне) вилуговування; б – підземне (шахтне) вилуговування у підірваних і магазинованих блоках;
 в – свердловинне вилуговування на проникних рудах у природному заляганні

Підземне виплавляння сірки (ПВС) запропоновано Г. Фаршем (США) у 1891 р. для застосування на прибережних родовищах Мексиканського залив. З 1912 р. метод ПВС зайняв домінуюче становище у світовій сірчаній промисловості. В Україні експлуатується Язівське родовище сірки (Львівська обл.), у Туркменії – Гаурдакське родовище.

Для здійснення методу ПВС до сірконосного пласта бурять свердловини діаметром 200 – 300 мм. У свердловині розміщують три трубопроводи для подавання води з температурою 165 – 170°C, нерозчинника (мазут, нафта, повітря) і транспортування розплавленої сірки на поверхню. Гаряча вода через верхню перфорацію подається в поклад, де розповсюджуючись по тріщинах, порах, кавернах рудного тіла, розплавляє сірку, яка під дією власної ваги стікає донизу і збирається навколо вибою свердловини. Рідка сірка відкачується на поверхню ерліфтом через фільтри і відправляється на склад готової продукції (рис. 1.4).

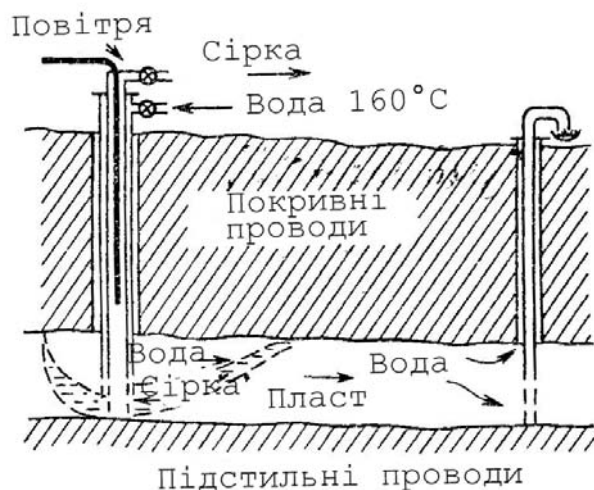


Рис. 1.4. Схема підземного виплавлення сірки

На виробництво 1 т сірки витрачається від 6 – 8 до 30 – 40 м³ гарячої води. Для заповнення пустот, які утворюються після виплавлення, а також відвернення витоку теплоносія через свердловини застосовується нагнітання глиняних матеріалів.

Свердловинне гідровидобування (СГВ) застосовується переважно для видобутку крихких неміцно зцементованих руд (рис. 1.5).

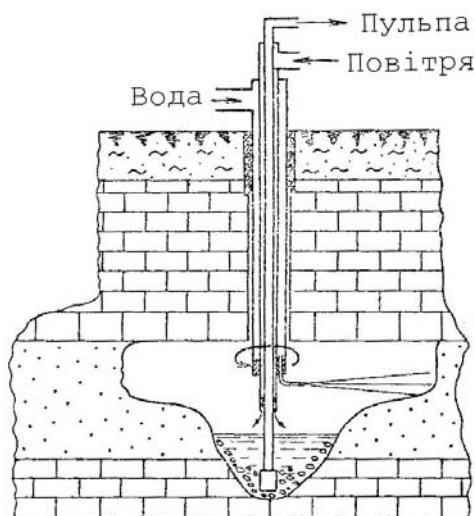


Рис. 1.5. Схема свердловинного гідровидобування корисних копалин

Під час СГВ родовища розкриваються свердловинами діаметром 100 – 300 мм. Масив руди руйнується струменем води або гідравлічним градієнтом. У першому випадку вода під тиском подається до насадок гідромонітора і відкачується ерліфтом через ту ж свердловину; у другому – вода в пласт нагнітається в одну групу свердловин, а пульпа відкачується із сусідніх свердловин.

Інтенсифікація руйнування можлива шляхом вібраційної дії, попереднього послаблення рудного масиву хімічними або мікробіологічними методами. На поверхню гідромаса видається гідроелеватором, ерліфтом у поєднанні з гідроелеватором або завдяки створенню надмірного тиску в пласті. СГВ може використовуватись для розробки родовищ з рудами невисокої міцності, які залягають під відносно міцними чи пластично-деформованими породами. Цей перспективний метод поки використовується у невеликих масштабах.

Підземна газифікація вугілля (сланцю) застосовується для одержання синтетичного генераторного газу для енергетичних чи хіміко-технологічних цілей, а також для одержання сірчаного газу із сірки.

Суттєву роль при застосуванні газифікації грає проникність покладу. В щільних покладах необхідно штучно створювати з'єднання (збивання) між нагнітальними і газовидавальними свердловинами шляхом вогневого збивання, гідророзриву, торпедування, електророзбивання. За схемами подачі окислювача можна виділити прямоточний і противоточний методи підземної газифікації. Як дуття для газифікації використовується повітря, кисень, паро- і водоповітряні суміші.

2. Термодинамічні процеси гірничого виробництва

2.1. Основні закони термодинаміки

Тепло- і масообмін, агрегатні та фазові перетворення при тепловій дії, окисно-відновлювальні процеси з видаленням чи поглинанням тепла є супутніми при різних технологічних процесах видобування і переробки корисних копалин.

Найважливішими природними ресурсами надр завжди були і будуть мінеральні багатства, які об'єднуються у загальну термодинамічну систему [3].

Термодинамічна система – це макроскопічне тіло, яке виділяють із навколишнього середовища при допомозі перегородок чи оболонок (вони можуть бути також уявними, умовними), стан якого можна охарактеризувати макроскопічними параметрами: об'ємом, температурою, тиском тощо. Навколишнім середовищем термодинамічної системи є тіла, що знаходяться за її межами.

Термодинамічні системи поділяються на гомогенні та гетерогенні.

До гомогенних систем відносяться такі, в яких хімічний склад і фізичні властивості однакові у всіх її частинах. До них належать абсолютно чисті мінерали, розплавлені та сублімовані гірські породи.

Гетерогенна термодинамічна система складена із двох і більше гомогенних частин. В середині такої системи є поверхні розподілу фаз, при переході через які хімічний склад і фізичні властивості речовини змінюються скачкоподібно. Практично всі гірські породи є гетерогенними системами, бо складені з багатьох однорідних і різнорідних мінеральних зерен, розділених між собою мінеральним цементом.

Фазою гетерогенної системи називають однорідну за хімічним складом і фізичними властивостями частину термодинамічної системи, яка відділена від другої частини (фази), що має інші властивості, межами розподілу, на яких відбуваються скачкоподібні зміни макроскопічного тіла.

Кожна термодинамічна система складена із однієї і більше компонент. Під компонентою розуміється кількість хімічно чистих елементів, що складають дану речовину. Наприклад, сидерит (Fe_2CO_3) складений з трьох частин: заліза, вуглецю і кисню; сфалерит (ZnS) – з двох компонент: цинку і сірки.

Мінерали та гірські породи у природному стані та внаслідок дії на них різних полів можуть знаходитись у трьох станах: твердому, рідкому і газоподібному. В рідкому стані знаходиться нафта, самородна ртуть, розчини мінералів, вільна і фізично зв'язана вода. У газоподібному стані – горючі гази.

Основними термодинамічними параметрами термодинамічної системи є температура, тиск і щільність тіла.

Температура T – фізична величина, що характеризує стан термодинамічної рівноваги системи. Якщо система не знаходиться у рівновазі, то між її частинами, які мають різну температуру, відбувається теплообмін. За одиницю

абсолютної температури в системі СІ прийнято кельвін (К) – це 1/273,15. Існують і інші температурні шкали з градуюванням у градусах Цельсія (°C), градусах Фаренгейта (°F), градусах Реґієра (°R), градусах Ренкіна (°Re). Найбільше розповсюдження одержала шкала в градусах Цельсія. В цій шкалі за один градус прийнята одна сота частина в інтервалі від температури плавлення льоду до температури кипіння води при атмосферному тиску. Перехід від градусів Цельсія (°C) до градусів інших температурних шкал наступний: $K = t^{\circ}C + 273,15$; $^{\circ}F = 1,8 \cdot t^{\circ}C + 32$; $^{\circ}R = 0,8 t^{\circ}C$; $^{\circ}Re = 1,8 \cdot (t^{\circ}C + 273,15)$.

Тиск P – це сила, що діє за нормаллю до поверхні тіла і віднесена до одиниці площі цієї поверхні, вимірюється у Па (Паскалях).

Одиниці виміру тиску, що не входять до системи СІ: бар, $1\text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$; атмосфера, $1\text{ атм} = 1,01323 \cdot 10^5 \text{ Па}$; міліметр ртутного стовпчика, $1 \text{ мм рт. ст.} = 133,322 \text{ Па}$; міліметр водяного стовпа, $1 \text{ мм вод. ст.} = 9,8067 \text{ Па}$. Розрізняють абсолютний тиск, достатній і атмосферний. Достатній технічний термін, застосовується для оцінки тиску, що створюється механізмом, наприклад, компресором, насосом, вентилятором.

Питомий об'єм v , $\text{м}^3/\text{кг}$, називають об'єм, що займає одиниця маси речовини,

$$v = \frac{V}{G},$$

де V – об'єм, м^3 ;

G – маса речовини, кг .

Найчастіше користуються не питомим об'ємом, а щільністю речовини γ , $\text{кг}/\text{м}^3$,

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{1}{v}.$$

Щільність речовини пов'язана з її питомою вагою $\gamma_{\text{щ}}$, $\text{Н}/\text{м}^3$, згідно другого закону Ньютона, наступним співвідношенням:

$$\gamma = \frac{\gamma_{\text{щ}}}{q},$$

де q – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$.

Внутрішня енергія і зовнішня робота. У процесі нагрівання деякого об'єму гірської породи, що знаходиться всередині масиву, її температура буде підвищуватись і при цьому буде змінюватись внутрішня енергія й утвориться зовнішня робота (рис. 2.1).

Внутрішня енергія U , Дж, виділеного об'єму створюється з енергії поступального й обертального рухів молекул, з яких складені мінерали, енергії внутрішньомолекулярних коливань, потенційної енергії сил взаємодії між молекулами.

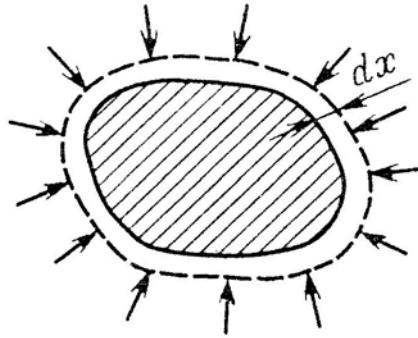


Рис. 2.1. Схема дії зовнішніх сил при розширенні твердих тіл

Частина внутрішньої енергії виділеного об'єму гірської породи під час нагрівання витрачається на розкривання міжзернових зв'язків у неоднорідних породах за рахунок внутрішніх термічних напружень, які виникають на межі мінеральних зерен, а також через різні значення їх модулів пружності та коефіцієнтів теплового розширення.

Величина $\bar{u} = \frac{U}{G}$, Дж/кг, називається питомою внутрішньою енергією – це енергія одиниці маси речовини, що є інтенсивним параметром. Існує ще екстенсивна характеристика, яка залежить тільки від параметрів стану і є пропорційною кількості речовини у термодинамічній системі. Як і всі екстенсивні параметри, внутрішня енергія – адитивна величина (адитивними називають величини, для яких виконується умова $Z_{\text{системи}} = \sum_{i=1}^n Z_i$, де n – кількість параметрів, з яких складена система). Інтенсивні параметри властивостями адитивності не володіють. За відсутності зовнішнього впливу стан гірської породи як термодинамічної системи може бути визначено, якщо задані два різних інтенсивних параметри. Всі інші параметри є їх однозначною функцією. Наприклад, питомий об'єм води при температурі $3,98^\circ \text{C}$ і тискові $9,8 \cdot 10^4 \text{ Па}$ дорівнює $10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$. При зміні T і P міняється і V , тобто

$$v = f(P, T).$$

Аналогічно

$$P = \psi(T, v) \\ \text{і } T = \varphi(P, v).$$

Рівняння, яке пов'язує всі параметри стану чистої речовини, називають рівнянням стану.

Початок відліку внутрішньої енергії можна вибирати довільно. Величина внутрішньої енергії термодинамічної системи визначається при заданих інших двох параметрах стану, тобто

$$\bar{u} = f(v, T); \quad \bar{u} = \varphi(P, T); \quad \bar{u} = \varphi(P, v).$$

Оскільки внутрішня енергія залежить тільки від параметрів стану, то її диференціал, наприклад, для функції $\bar{u} = f(v, T)$, має вигляд:

$$d\bar{u} = \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T \cdot dv + \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \cdot dT,$$

де індекси у частинних похідних означають, що вони прийняті при постійності тієї величини, яка стоїть в індексі.

Диференціали таких функцій, як тепло і робота, не є повними і мають несконченно малі величини, бо вони залежать від того, яким шляхом були досягнуті параметри системи при її переході зі стану 1 у стан 2 (рис. 2.2).

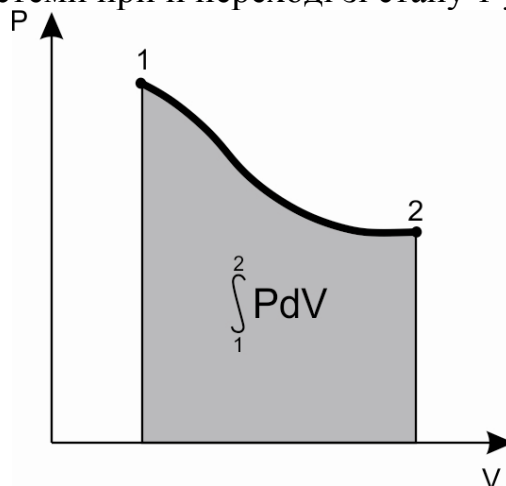


Рис.2.2. PV -діаграма роботи розширення при переході термодинамічної системи зі стану 1 у стан 2

У процесі нагрівання виділеного об'єму гірської породи (див. рис. 2.1) він буде розширюватись. Якщо припустити, що тиск оточуючого масиву дорівнює P , то зростання цього об'єму буде супроводжуватись роботою проти зовнішнього тиску, яка має назву зовнішньої роботи.

Позначимо поверхню виділеного об'єму через F , зміну об'єму – dV , переміщення кожної точки поверхні виділеного об'єму – dx . Враховуючи, що тиск – це сила, що діє за нормаллю на одиниці поверхні виділеного об'єму, тому

$$P_c = P \cdot F,$$

де P_c – сумарна сила, що діє на всю поверхню виділеного об'єму породи, H .

У цьому випадку зовнішня робота – це робота розширення dA виділеного об'єму породи проти зовнішнього тиску:

$$dA = P_c \cdot dx = P \cdot F \cdot dx,$$

якщо

$$F \cdot dx = dV,$$

то

$$dA = P \cdot dV,$$

або для кінцевого процесу

$$A = \int_{V_1}^{V_2} P \cdot dV. \quad (2.1)$$

Робота розширення відбувається тільки у тому випадку, коли є зміна об'єму породи. Таку роботу можна визначити за допомогою PV -діаграми.

Зовнішня робота під час переходу системи зі стану 1 у стан 2 графічно може бути визначена як заштрихована площа (див. рис. 2.2).

Робота розширення при переході термодинамічної системи зі стану 1 у стан 2 залежить не тільки від їх параметрів, але й від того, яким шляхом виконується процес розширення.

Для розуміння суті вищенаведеного матеріалу надаємо приклад рішення практичної задачі з визначення роботи руйнування граніту термічним способом.

Приклад 2.1. Визначити роботу руйнування при термічному подрібненні негабаритного куска граніту об'ємом $V = 2 \text{ м}^3$ шляхом його розігріву на поверхні пробуреного в ньому шпуру. При цьому середня температура негабариту змінилась від

$T = 293 \text{ К}$ (20°C) до $T = 298 \text{ К}$ (25°C). Середній коефіцієнт об'ємного теплового розширення граніту в цьому діапазоні температур складає $\omega_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$, межа міцності граніту на розтягування – $\sigma_p = 150 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Рішення. При заданому способі подрібнення негабаритних кусків гірських порід руйнування їх відбувається в той момент, коли розтягальний тиск P , який направлений перпендикулярно радіусу шпуру, досягне під час нагріву граніту межі міцності його на розтягу, тобто, коли $P = \sigma_p$.

Згідно (2.1)

$$A = \int_{293}^{298} P \cdot V \cdot \omega_0 \cdot dT,$$

$$\text{або } A = \int_{293}^{298} \sigma_p \cdot V \cdot \omega_0 \cdot dT = \sigma_p \cdot V \cdot \omega_0 \cdot (298 - 293) = 150 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 10^{-5} \cdot 5 = 3 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Перший закон термодинаміки

Під час підведення тепла до породи зростає її температура і збільшується об'єм. При цьому підведене тепло (як було відзначено вище) витрачається на збільшення внутрішньої енергії породи U , роботу розширення A й інші види роботи A' . Згідно закону збереження енергії [4]

$$Q_{1-2} = U_{1-2} + A_{1-2} + A'_{1-2}, \quad (2.2)$$

де Q_{1-2} – тепло, передане виділеному об'єму породи в період нагріву її від стану 1 до стану 2, Дж.

Вираз (2.2) у диференціальній формі

$$dQ = dU + dA + dA'. \quad (2.3)$$

Рівняння (2.2) і (2.3) являють собою математичний вираз першого закону термодинаміки.

Через те що зовнішня робота, яка виконується в період розширення породи, залежить від шляху процесу, то і кількість підведеного тепла також залежить від нього.

Для одиниці маси породи рівняння першого закону термодинаміки має вигляд:

$$dq = d\bar{u} + d\bar{A} + d\bar{A}',$$

або

$$dq = d\bar{u} + P \cdot dv + d\bar{A}',$$

де q – кількість тепла, що підведене до одиниці маси породи, Дж/кг;

\bar{A} і \bar{A}' – відповідно робота розширення й інші види роботи, що виконуються одиницею маси породи, Дж/кг.

Приклад 2.2. Визначити зміни внутрішньої енергії негабаритного куска граніту при його термічному подрібненні. Умови відповідають прикладу 2.1. Середня об'ємна теплоємність граніту у діапазоні температур від $T_1 = 293$ К (20°C) до $T_2 = 298$ К (25°C) складає $C_v = 1,6 \cdot 10^3$ Дж/(м³·К).

Рішення. Враховуючи, що при даному способі подрібнення негабаритних кусків гірських порід, окрім роботи розширення, інші види робіт відсутні, згідно (2.2) маємо

$$U_{1-2} = Q_{1-2} - A_{1-2},$$

або

$$U_{1-2} = V \cdot C_v \cdot (T_2 - T_1) - A_{1-2}.$$

Із вищенаведеного бачимо, що коли один із параметрів системи змінюється, то відбувається також і зміна стану системи, тобто відбувається термодинамічний процес, який є результатом сукупності змінюваних станів. Термодинамічні процеси розподіляються на рівноважні та нерівноважні.

Рівноважними називають такі процеси, при яких система переходить послідовно з одного стану рівноваги в другий. Під станом рівноваги термодинамічної системи розуміють такий стан, до якого вона прямує, приймаючи при цьому мінімальні значення загальної енергії. У стані рівноваги параметри системи за відсутності зовнішнього впливу залишаються постійними.

Нерівноважні – це такі процеси, які не супроводжуються станами рівноваги. Для нерівноважних процесів характерно, що частини системи мають різнобічні термодинамічні параметри. Рівноважний стан є граничним випадком нерівноважного, якщо швидкість процесу прямує до нуля.

Теоретично всі термодинамічні процеси – нерівноважні, а практично багато з них можна вважати рівноважними з деяким наближенням.

Якщо в рівноважному процесі температура системи не змінюється, то процес – ізотермічний. Прикладом таких процесів є агрегатні (фазові) переходи з твердих гірських порід у рухливі (плавлення сірки, випарювання солі, сублімація ртуті).

Рівноважний процес, при якому постійним є тиск, називається ізобарним. Наприклад, підземна газифікація твердого палива, коли загальний тиск у газових продуктах горіння залишається постійним.

Якщо у рівноважному процесі не змінюється об'єм, то такий процес – ізохорний. Прикладом ізохорного процесу може бути термічне й електротермічне подрібнення негабаритів гірських порід.

Термодинамічний процес коли система переходить із стану 1 у стан 2, називають прямим, а із стану 2 у стан 1 – оборотний (див. рис. 2.2).

Якщо при оборотному процесі термодинамічна система повертає у висхідний стан, проходячи при цьому через ті ж проміжні стани, що і при прямому, то такий процес називають оборотним. У цьому випадку сукупність прямого й оборотного процесів не призведе до зміни параметрів навколишнього середовища. При оборотних процесах прямі й оборотні шляхи є дзеркальним відображенням один одного. Наприклад, у прямому процесі до системи підводиться тепло і вона розширюється, створюючи роботу над навколишнім середовищем, а в оборотному процесі відводиться від системи така ж кількість тепла, вона звужується, і зовнішнє середовище виконує над нею роботу.

Якщо при оборотному процесі не виконуються умови оборотності, то такий процес називають необоротним. Всі необоротні процеси відбуваються до тих пір, поки не встановлюється рівновага у системі. Робота системи створюється тільки у тому випадку, якщо нею не досягнуто стану рівноваги. У рівноважному стані термодинамічна система не створює роботу над навколишнім середовищем.

Ентальпія й ентропія термодинамічної системи

Ентальпія \dot{I} , Дж, або тепловміст термодинамічної системи, – це сума повної внутрішньої енергії та добутку тиску P у системі на її об'єм V :

$$\dot{I} = U + PV.$$

Ентальпія є екстенсивним параметром і може бути виражена через питому масову ентальпію i , Дж/кг, наступним чином

$$\dot{I} = i \cdot G,$$

де

$$i = u + P_v.$$

Ентальпія, яка віднесена до одного моля речовини, називають мольною ентальпією, Дж/моль,

$$i_\mu = \dot{I}/M,$$

де M – кількість молей речовини в системі, моль.^(*)

Як і внутрішня енергія, ентальпія є функцією двох різних параметрів стану, вона не залежить від шляху процесу і визначається параметрами початкового і кінцевого станів системи:

$$i = f(v, T); \quad i = \varphi(P, T); \quad i = \psi(P, v); \quad (2.19)$$

Приклад 2.3. Визначити ентальпію куска залізуватого кварциту об'ємом $V = 1\text{ м}^3$ при температурі $T = 400\text{ К}$ (127°С). Мінеральний склад залізного кварциту наступний: магнетит Fe_3O_4 – 35 %, гематит Fe_2O_3 – 20 %, кварц SiO_2 – 45 %.

Рішення. Ентальпія $I_{з.к.}$ куса залізного кварциту об'ємом $V = 1 \text{ м}^3$ при температурі $T = 400 \text{ К}$ відповідає

$$I_{з.к.} = \dot{I}_{з.к.}^{298} + \dot{I}_{з.к.}^{400} = (\dot{i}_{з.к.}^{298} + \dot{i}_{з.к.}^{400}) \cdot V \cdot \gamma_{з.к.},$$

де $\dot{I}_{з.к.}^{298}$ – зміна ентальпії, Дж, при нагріві залізного кварциту від $T = 0 \text{ К}$ до стандартної температури $T = 298 \text{ К}$;

$\dot{I}_{з.к.}^{400}$ – зміна ентальпії при нагріві залізного кварциту від стандартної температури до $T = 400 \text{ К}$, Дж;

$\dot{i}_{з.к.}^{298}$ – стандартна питома ентальпія залізного кварциту; Дж/кг;

$\dot{i}_{з.к.}^{400}$ – зміна питомої ентальпії залізного кварциту при нагріві від стандартної температури $T = 298 \text{ К}$ до $T = 400 \text{ К}$, Дж/кг;

$\gamma_{з.к.}$ – щільність залізного кварциту, кг/м^3 ,

$$\gamma_{з.к.} = \sum_1^n D_n \cdot \gamma_n = D_m \cdot \gamma_m + D_z \cdot \gamma_z + D_k \cdot \gamma_k,$$

де D_m, D_z, D_k – частка відповідно магнетиту, гематиту і кварцу у залізистому кварциті;

$\gamma_m, \gamma_z, \gamma_k$ – щільність відповідно магнетиту, гематиту і кварцу;

$$\gamma_m = 5,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \gamma_z = 5,25 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \gamma_k = 2,64 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3,$$

тоді

$$\gamma_{з.к.} = 0,35 \cdot 5,2 \cdot 10^3 + 0,2 \cdot 5,25 \cdot 10^3 + 0,45 \cdot 2,64 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

Зміна питомої ентальпії залізного кварциту в процесі нагріву від $T = 298 \text{ К}$ до $T = 400 \text{ К}$ складе

$$\dot{i}_{з.к.}^{400} = \sum_1^n D_n \cdot \dot{i}_n^{400} = D_m \cdot \dot{i}_m^{400} + D_z \cdot \dot{i}_z^{400} + D_k \cdot \dot{i}_k^{400},$$

де $\dot{i}_m^{400}, \dot{i}_z^{400}, \dot{i}_k^{400}$ – зміна питомої ентальпії відповідно магнетиту, гематиту і кварцу, Дж/кг.

Стандартна питома ентальпія залізного кварциту

$$\dot{i}_{з.к.}^{298} = \sum_1^n D_n \cdot \dot{i}_n^{298} = D_m \cdot \dot{i}_m^{298} + D_z \cdot \dot{i}_z^{298} + D_k \cdot \dot{i}_k^{298},$$

де $\dot{i}_m^{298}, \dot{i}_z^{298}, \dot{i}_k^{298}$ – стандартна питома ентальпія відповідно магнетиту, гематиту і кварцу, Дж/кг.

*) Моль – хімічний термін, це така кількість даної речовини, вага якої при вираженні в грамах чисельно дорівнює молекулярній вазі. Наприклад, при молекулярній вазі сірчаної кислоти (H_2SO_4), що має 98,082, один моль складе 98,082 г. Об'єм ідеального газу при нормальних умовах (0° С , і тиску 760 мм рт. ст.) дорівнює 22,415 л. Моль повітря приймається рівним 29 г.

Величину \dot{i}^{298} для багатьох мінералів можна прийняти з книги [5]. Зміна питомої ентальпії визначається за формулою:

$$di = C_p(T) \cdot dT. \quad (2.4)$$

Проінтегрувавши (2.4), одержимо:

$$\dot{i}_{з.к.}^{400} = \int_{298}^{400} C_p(T) \cdot dT,$$

де $C_p(T)$ – ізобарна питома теплоємність, Дж/(кг · К).

Величина $C_p(T)$, Дж/(кг · К), є функцією температури, для багатьох мінералів її вигляд встановлено і визначено (див. [5]).

$$C_p(T) = (x + y \cdot 10^{-3} \cdot T + z \cdot 10^{-5} \cdot T^2) \cdot \frac{4,187}{\mu},$$

де x, y, z – постійні;

μ – молекулярна маса мінералу, кг/моль.

Магнетит

$x = 39,22; y = 18,86; z = -10,01; \mu_m = 231,55 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Гематит

$x = 23,49; y = 18,6; z = -3,55; \mu_m = 159,7 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Кварцит

$x = 11,22; y = 8,2; z = -2,7; \mu_m = 60,09 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Зміна питомої ентальпії мінералів у процесі нагріву від стандартної температури $T = 298$ К до $T = 400$ К, Дж/кг,

$$\begin{aligned} i^{400} &= \int_{298}^{400} C_p(T) \cdot dT = \int_{298}^{400} (x + y \cdot 10^{-3} \cdot T + z \cdot 10^{-5} \cdot T^2) \cdot (4,187/\mu) \cdot dT = \\ &= \frac{4,187}{\mu} \cdot \left(xT + \frac{yT^2}{2 \cdot 10^3} - \frac{z \cdot 10^{-5}}{T} \right) \Big|_{298}^{400} = \dots \Rightarrow \\ &= \frac{4,187}{\mu} \left\{ \left[400 + \frac{400^2 \cdot y}{2 \cdot 10^3} - \frac{10^{-5} \cdot z}{400} \right] - \left[298 + \frac{298^2 \cdot y}{2 \cdot 10^3} - \frac{10^{-5} \cdot z}{298} \right] \right\}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Підставляючи у (2.5) значення x, y, z , відповідно для магнетиту, гематиту і кварцу, одержимо $i_m^{400} = 9,7 \cdot 10^4$ Дж/кг; $i_z^{400} = 7,7 \cdot 10^4$ Дж/кг; $i_k^{400} = 10^5$ Дж/кг.

Стандартна питома ентальпія магнетиту, гематиту і кварцу згідно [5] відповідно буде

$i_m^{298} = 10,6 \cdot 10^4$ Дж/кг; $i_z^{298} = 9,75 \cdot 10^4$ Дж/кг;

$i_k^{298} = 11,5 \cdot 10^5$ Дж/кг.

У цілому

$i_{з.к.}^{298} = D_m \cdot i_m^{298} + D_z \cdot i_z^{298} + D_k \cdot i_k^{298},$

$i_{з.к.}^{298} = 0,35 \cdot 10^6 \cdot 10^4 + 0,2 \cdot 9,75 \cdot 10^4 + 0,45 \cdot 11,5 \cdot 10^4 = 10,83 \cdot 10^4$ Дж/кг.

$i_{з.к.}^{400} = D_m \cdot i_m^{400} + D_z \cdot i_z^{400} + D_k \cdot i_k^{400},$

$i_{з.к.}^{400} = 0,35 \cdot 9,7 \cdot 10^4 + 0,2 \cdot 7,7 \cdot 10^4 + 0,45 \cdot 10^5 = 9,44 \cdot 10^4$ Дж/кг.

$\dot{I}_{з.к.} = (i_{з.к.}^{298} + i_{з.к.}^{400}) \cdot V \cdot \gamma_{з.к.},$

$\dot{I}_{з.к.} = (10,83 \cdot 10^4 + 9,44 \cdot 10^4) \cdot 1 \cdot 4,08 \cdot 10^3$ Дж.

В оборотних процесах, після переходу термодинамічної системи зі стану 1 у стан 2 і назад (див. рис. 2.2), внутрішня енергія її не змінюється, бо ця енергія залежить тільки від початкових і кінцевих параметрів стану системи і не залежить від шляху процесу. Таким чином, в оборотних процесах після повернення системи у висхідне положення може відбутися тільки зміна зовнішньої роботи під дією підведеної енергії. Різниця між підведеною кількістю енергії у прямому Q_1 і відведеному у зворотному Q_2 напрямках оборотного процесу дорівнюватиме енергії, яка витрачена на зовнішню роботу. Відношення цієї різниці енергії до витраченої називають термодинамічним коефіцієнтом корисної дії (ККД) оборотного процесу:

$$\eta_m = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (2.6)$$

Термодинамічний ККД оборотного процесу можна подати ще й у вигляді:

$$\eta_m = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (2.7)$$

де T_1 і T_2 – відповідно температура системи у станах 1 і 2. Із (2.6) і (2.7) випливає, що $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$, або $\frac{Q_1}{T_1} = Q_2 \cdot T_2$. (2.8)

Вираз (2.8) можна навести у вигляді:

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} = 0,$$

або у загальному вигляді: $\sum(Q/T) = 0$. (2.9)

Вираз (2.9) для оборотного процесу можна навести як інтеграл у замкнутому колі від функції dQ/T , тобто $\oint dQ/T = 0$ (2.10)

Підінтегральний вираз (2.10) можна замінити диференціалом деякої функції S , Дж/К, яку називають ентропією, тобто

$$dS = dQ/T. \quad (2.11)$$

З урахуванням цього виразу (2.10) можна подати у вигляді:

$$\oint dS = 0 \quad (2.12)$$

Вираз (2.12) підтверджує те, що в оборотних процесах зміна ентропії системи дорівнює нулю, тобто ентропія не залежить від шляху процесу, а визначається тільки параметрами початкового кінцевого станів.

Ентропія системи, яка віднесена до маси, називається питомою ентропією, \bar{S} , Дж/(кг·К),

$$\bar{S} = S / Q.$$

Ентропія однозначно може бути визначена, якщо задані два будь-які параметри стани, тобто

$$\bar{S} = f(v, T); \bar{S} = \varphi(P, T); \bar{S} = \psi(P, v).$$

Через те, що в процесі нагріву системи $dQ > 0$, а при охолодженні $dQ < 0$, то згідно (2.11), при нагріві ентропія системи зростає $dS > 0$, а при охолодженні знижується $dS < 0$.

Інтегрування лівої та правої частин рівняння (2.11) дає

$$S_1 - S_2 = \int_1^2 dQ / T. \quad (2.13)$$

Якщо інтервал зміни температури невеликий і в його межах можна прийняти теплоємність гірської породи постійною і такою, що не залежить від температури, то згідно (2.13) зміна ентропії

$$S_1 - S_2 = \int_1^2 G \cdot c \cdot \frac{dT}{T} = G \cdot c \int_1^2 \frac{dT}{T} = G \cdot c \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad (2.14)$$

де c – питома теплоємність породи, Дж/(кг·К).

Приклад 2.4. Визначити зміну ентропії 10 кг сірки при нагріві її від температури $T_1 = 293 \text{ K}$ (20° C) до $T_2 = 333 \text{ K}$ (60° C). Середня питома теплоємність сірки у даному діапазоні температур дорівнює $c = 0,54 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$.

Рішення. Згідно (2.14) маємо

$$S_1 - S_2 = S_{1-2} = 10 \cdot 0,54 \cdot 10^3 \cdot \ln\left(\frac{333}{293}\right) = 6,15 \cdot 10^3 \text{ Дж/К.}$$

Теплоємність порід залежить від температури, тобто $c = c(T)$, тому для точного розрахунку зміни ентропії необхідно користуватись формулою:

$$S_1 - S_2 = G \int_1^2 c(T) \cdot d\frac{T}{T_0}$$

Для адіабатичних процесів $dQ = 0$ і тому з виразу (2.11) необхідно $dS = 0$ або $S = \text{const.}$

Тому адіабатичні процеси також називають ще ізоентропійними.

Приклад 2.5. Визначити ентропію куска залізистого кварциту об'ємом $V = 1 \text{ м}^3$ при температурі $T = 498 \text{ K}$ (225° C). Мінеральний склад залізистого кварциту: магнетит Fe_3O_4 – 35 %, гематит Fe_2O_3 – 20 %, кварц SiO_2 – 45 %.

Рішення. Ентропія $S_{з.к.}$ куска залізистого кварциту об'ємом 1 м^3 при температурі $T = 498 \text{ K}$

$$S_{з.к.} = S_{з.к.}^{298} + S_{з.к.}^{498} = \left(\bar{S}_{з.к.}^{298} + \bar{S}_{з.к.}^{498} \right) \cdot V \cdot \gamma_{з.к.},$$

де $S_{з.к.}^{298}$ – зміна ентропії залізистого кварциту від $T = 0 \text{ K}$ до стандартної температури $T = 298 \text{ K}$ (стандартна ентропія), Дж/К;

$S_{з.к.}^{498}$ – зміна ентропії залізистого кварциту при його нагріві від стандартної температури $T = 298 \text{ K}$ до $T = 498 \text{ K}$, Дж/К;

$\bar{S}_{з.к.}^{298}$ – стандартна питома ентропія залізистого кварциту при нагріві від $T = 0 \text{ K}$ до стандартної температури $T = 298 \text{ K}$, Дж/(кг·К);

$\bar{S}_{з.к.}^{498}$ – зміна питомої ентропії залізистого кварциту при нагріві його від $T = 298 \text{ K}$ до $T = 498 \text{ K}$, Дж/(кг·К);

$\gamma_{з.к.}$ – щільність залізистого кварциту, кг/м³;

$$\gamma_{з.к.} = \sum_1^n D_n \cdot \gamma_n = D_m \cdot \gamma_m + D_z \cdot \gamma_z + D_k \cdot \gamma_k,$$

де D_m, D_z, D_k – доля відповідно магнетиту, гематиту, кварцу в залізистому кварциті; $\gamma_m, \gamma_z, \gamma_k$ – щільність відповідно магнетиту, гематиту, кварцу, $\gamma_m = 5,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\gamma_z = 5,25 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$; $\gamma_k = 2,64 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

$$\gamma_{з.к.} = \sum_1^n D_n \cdot \gamma_n = 0,35 \cdot 5,2 \cdot 10^3 + 0,2 \cdot 5,25 \cdot 10^3 + 0,45 \cdot 2,64 \cdot 10^3 = 4,08 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3.$$

Зміна питомої ентропії залізистого кварциту в процесі його нагріву від $T = 298 \text{ K}$ до $T = 498 \text{ K}$

$$\bar{S}_{з.к.}^{498} = \sum_1^n D_n \cdot \bar{S}_n^{498} = D_m \cdot \bar{S}_m^{498} + D_z \cdot \bar{S}_z^{498} + D_k \cdot \bar{S}_k^{498},$$

де \bar{S}_m^{498} , \bar{S}_z^{498} , \bar{S}_k^{498} – відповідно зміна питомої ентропії магнетиту, гематиту, кварцу при нагріві від $T = 298 \text{ K}$ до $T = 498 \text{ K}$, Дж/(кг·К).

Стандартна питома ентропія залізистого кварциту

$$\bar{S}_{з.к.} = \sum_1^n D_n \cdot \bar{S}_m^{298} = D_m \cdot \bar{S}_m^{298} + D_z \cdot \bar{S}_z^{298} + D_k \cdot \bar{S}_k^{298},$$

де \bar{S}_m^{298} , \bar{S}_z^{298} , \bar{S}_k^{298} – відповідно стандартна питома ентропія магнетиту, гематиту і кварцу, Дж/(кг·К).

Величина \bar{S}^{298} для багатьох мінералів наведена у довідниках.

Відомо, що теплоємність S (кількість тепла, що необхідно для нагріву тіла на один градус) визначається як похідна від кількості тепла, підведеного до тіла, визначається за формулою $C = dQ/dT$, тому зміна питомої ентропії відбувається за законом $d\bar{S} = C_p(T) \cdot \frac{dT}{T}$ чи відносно до даного прикладу

$$\bar{S}_{з.к.}^{498} = \int_{298}^{498} C_p(T) \cdot \frac{dT}{T},$$

де $C_p(T)$ – ізобарна питома теплоємність, Дж/(кг·К).

Функція $C_p(T)$ для мінералів має вигляд:

$$C_p(T) = (x + y \cdot 10^{-3} \cdot T + z \cdot 10^{-5} \cdot T^2) \cdot (4,187/\mu),$$

де x, y, z – постійні;

μ – молекулярна маса мінералу, кг/моль.

Для магнетиту (див. довідники) $x = 39,22$, $y = 18,86$, $z = -10,01$,

$\mu_m = 231,55 \cdot 10^{-3}$ кг/моль;

гематиту $x = 23,49$, $y = 18,6$, $z = -3,55$, $\mu_z = 159,7 \cdot 10^{-3}$ кг/моль;

кварцу $x = 11,22$, $y = 8,2$, $z = -2,7$, $\mu_k = 60,09 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Зміна питомої ентропії мінералів під час нагріву їх від $T = 298$ К до $T = 498$ К

$$\begin{aligned} \bar{S}^{498} &= \int_{298}^{498} \frac{C_p(T)}{T} \cdot dT = \int_{298}^{498} \left(\frac{x}{T} + \frac{y}{10^3} + \frac{z \cdot 10^{-5}}{T^3} \right) \cdot \frac{4,187}{\mu} \cdot dT \Rightarrow \dots \\ &\Rightarrow \frac{4,187}{\mu} \left[x \ln \left(\frac{498}{298} \right) + \frac{y \cdot (498 - 298)}{10^3} - \frac{z \cdot 10^{-5}}{2 \cdot (498^2 - 298^2)} \right] \end{aligned} \quad (2.15)$$

Підставивши у вираз (2.15) значення x, y, z, μ відповідно для магнетиту, гематиту і кварцу одержимо $\bar{S}_m^{498} = 428$ Дж/(кг·К); $\bar{S}_z^{498} = 415$ Дж/(кг·К); $\bar{S}_k^{498} = 315$ Дж/(кг·К).

Використовуючи довідники, визначимо стандартну питому ентропію магнетиту, гематиту і кварцу

$$\bar{S}_m^{298} = 650 \text{ Дж/(кг·К)}; \bar{S}_z^{298} = 850 \text{ Дж/(кг·К)}; \bar{S}_k^{298} = 687 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Таким чином, кінцевий результат

$$\begin{aligned} \bar{S}_{з.к.}^{298} &= D_m \cdot \bar{S}_m^{298} + D_z \cdot \bar{S}_z^{298} + D_k \cdot \bar{S}_k^{298} = 0,35 \cdot 650 + 0,2 \cdot 850 + \dots \\ &\dots \rightarrow +0,45 \cdot 687 = 708 \text{ Дж / (кг·К)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_{з.к.}^{498} &= D_m \cdot \bar{S}_m^{498} + D_z \cdot \bar{S}_z^{498} + D_k \cdot \bar{S}_k^{498} = 0,35 \cdot 428 + 0,2 \cdot 415 + \dots \\ &\dots \rightarrow +0,45 \cdot 315 = 464 \text{ Дж / (кг·К)}; \end{aligned}$$

$$\bar{S}_\Delta = \left(\bar{S}_{з.к.}^{298} + \bar{S}_{з.к.}^{498} \right) \cdot V \cdot \gamma_{з.к.} = (708 + 464) \cdot 1 \cdot 4,08 \cdot 10^3 = 4,4 \cdot 10^3 \text{ Дж/К}.$$

Зростання ентропії у необоротних процесах.
Другий та об'єднаний закони термодинаміки

Необоротні процеси відбуваються в ізольованій термодинамічній системі (система, межа якої з навколишнім середовищем є ідеальним теплоізолятором і абсолютно жорстка). Для такої системи $dQ = 0$ (межа теплоізольована) і $P \cdot dV = 0$ (межа абсолютно жорстка), тому, згідно з першим законом термодинаміки і $dU = 0$ [4].

Вважаємо, що система складена з двох частин, які мають температуру T_1 і T_2 , причому $T_1 > T_2$. При такій умові тепло від першої частини буде переходити до другої. Ентропія першої частини системи при цьому зменшиться на

$$dS_1 = -dQ/T_1,$$

а ентропія другої частини зросте на

$$dS_2 = dQ/T_2.$$

Згідно з законом збереження енергії загальна зміна ентропії системи дорівнює алгебраїчній сумі складових, тобто

$$dS = dQ \cdot (1/T_2 - 1/T_1). \quad (2.16)$$

Так як $T_1 > T_2$, то згідно (2.16)

$$dS > 0. \quad (2.17)$$

Вираз (2.17) свідчить про те, що ентропія у необоротних процесах ізольованої системи завжди зростає. Якщо система не ізольована, то вираз (2.17) можна записати у вигляді

$$dS > dQ/T. \quad (2.18)$$

Таким чином, згідно (2.11) і (2.18), ентропія різних процесів не може зменшуватись (для оборотних процесів вона постійна, а для необоротних – зростає), тобто

$$dS \geq 0 \text{ або } dS \geq dQ/T. \quad (2.19)$$

Співвідношення (2.19) є аналітичним виразом другого закону термодинаміки і свідчить про те, що без зовнішнього впливу процеси можуть відбуватися тільки у тому випадку, коли ентропія постійна (оборотні процеси, чому відповідає знак рівності) або зростає (необоротні процеси, чому відповідає знак більше).

Вираз (2.19) можна записати у вигляді

$$T \cdot dS \geq dQ \quad (2.20)$$

Підставляючи значення dQ з (2.20) у рівняння першого закону термодинаміки (2.3) одержимо рівняння об'єднаного закону термодинаміки

$$T \cdot dS \geq dU + dA + dA',$$

або

$$T \cdot dS \geq dU + P \cdot dA + dA'$$

Контрольні запитання

1. Назвіть відмінні особливості гомогенних і гетерогенних термодинамічних систем.
2. Яка існує взаємодія між інтенсивними й екстенсивними параметрами стану термодинамічної системи?
3. Як змінюється питома внутрішня і загальна поверхнева енергія гірської породи в процесі її подрібнення?
4. Яка порода знаходиться в більш рівноважному стані: нагріта чи холодна, більш чи менш подрібнена?
5. Яке фізичне розуміння ентальпії й ентропії? За яких умов ці параметри зростають і зменшуються?
6. В яких випадках виникає раніше термодинамічна рівновага: в ізольованій чи в неізольованій термодинамічній системі?

2.2. Теплопередача в твердих тілах і газах

Процес перенесення енергії в твердих тілах має назву теплопровідності і є незворотним. Для нього суттєво не тільки знання температури тіла, але й градієнта температури, який визначає тепловий потік. Зв'язок між тепловим потоком і градієнтом температури може бути одержаний за допомогою загального виразу для інтенсивності джерела ентропії чи експериментальним шляхом. Дослідним шляхом зв'язок між тепловим потоком і твердим тілом і градієнтом температури одержав Фур'є в 1882 р.

$$\dot{I}_q = -\lambda \operatorname{grad} T. \quad (2.21)$$

Коефіцієнт пропорційності λ називають ще коефіцієнтом теплопровідності. Гірські породи в першому наближенні можна вважати ізотропними, а коефіцієнт теплопровідності – скаляром [6].

Виведемо диференціальне рівняння якому підпорядковується зміна температури в ізотропному твердому тілі. Для повної енергії елементарного об'єму твердого тіла закон збереження енергії з урахуванням внутрішнього джерела тепла має вигляд

$$\frac{\partial W}{\partial t} = -d_{iv} \cdot \dot{I}_w + q_w, \quad (2.22)$$

де w – повна енергія елементу об'єму;

\dot{I}_w – потік тепла;

q_w – потужність об'ємних джерел тепла.

Зв'язок між W і T можна навести у вигляді

$$W = \rho \cdot c_v \cdot T. \quad (2.23)$$

Підставив вирази (2.21) і (2.23) у (2.22) одержимо загальний вигляд рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial(\rho \cdot c_v \cdot T)}{\partial t} = d_{iv} \cdot (\lambda \operatorname{grad} T) \cdot q_v. \quad (2.24)$$

Коефіцієнт теплопровідності λ можна визначити з закону Фур'є:

$$\lambda = -q / \frac{\partial T}{\partial x}.$$

Фізично він характеризує здатність тіла проводити тепло.

Теплові режими бувають сталими і несталими (нестаціонарними).

Сталий тепловий режим характеризується незмінюваністю температури у часі.

Несталий тепловий режим характеризується зміною температури у часі.

Якщо температура теплоносія T_m , температура поверхні T_n , а початкова температура породи T_0 у всіх точках однакова, то безрозмірна температура породи:

$$\Theta = (T - T_n) / (T_0 - T_n) \text{ і } \Theta = (T - T_m) / (T_0 - T_n), \quad (2.25)$$

де T – поточна температура у заданій точці.

Якщо є початкове розподілення температури в породі з перепадом $\Delta T = T - T_0$ між окремими шарами, то безрозмірна температура оцінюється наступним чином:

$$\Theta = (T - T_n) / \Delta T. \quad (2.26)$$

У цьому випадку вона характеризує собою відношення перепаду температури між даною точкою і поверхністю породи в заданий момент часу до початкового перепаду температур між шарами.

Якщо температура поверхні породи чи температура теплоносія залежить від часу τ , наприклад, лінійно, то безрозмірна температура буде

$$\Theta = (T - T_0) / (b\tau), \quad (2.27)$$

де b – коефіцієнт, який характеризує зміну температури поверхні породи чи теплоносія в одиницю часу, К/с.

У цьому випадку Θ характеризує собою відношення зміни температури в даній товщі породи до зміни її температури в конкретний момент часу.

При граничних умовах безрозмірна температура

$$\Theta = (T - T_0) / (\bar{T}_\tau - T_0),$$

де $(\bar{T}_\tau - T_0)$ – прирощення середньої температури \bar{T}_τ у різний момент часу, К.

Середню температуру \bar{T} в об'ємі породи, який розглядається, чи її частини можна визначити за формулою

$$\bar{T} = V^{-1} \int T \cdot dv, \quad (2.28)$$

де V – об'єм масиву породи.

Гradient температури теплової моделі

$$\frac{\partial \Theta}{\partial x} = - \frac{2F_0}{x} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial F_0}. \quad (2.29)$$

Тепловміст Q в об'ємі масиву породи V чи в його частині буде

$$Q = c \int_v T dV = cVT, \quad (2.30)$$

де c – об'ємна теплоємність породи, Дж/(м³·К).

Якщо за деякий проміжний час температура об'єму породи, який розглядається, змінилась на ΔT , то зміна його тепловмісту визначається за формулою

$$\Delta Q = c \int_V \Delta T dV = cV \Delta T. \quad (2.31)$$

При розгляді теплопередачі в газах необхідно використовувати теорію газів, що дозволяє виконати аналіз різноманітних процесів переносу – дифузії, теплопровідності, в'язкості. Різноманітний процес перенесення виникає, якщо в системі існує нерівноважність хоча б за одним із параметрів.

Зв'язок між властивостями індивідуальних молекул і властивостями речовини в цілому повинен бути через середні чинники великої кількості молекул. Виконати усереднення можна з різним ступенем точності залежно від складності осереднення закладених у модель уявлень. Найбільш простим є результати кінетичної теорії, в якій всім без виключення молекулам приписуються однакові властивості й однакові швидкості руху. При ускладненні теорії вводять функцію розподілення частинок за швидкостями, враховують різницю у масах частинок тощо [7].

Розглянемо деякі найпростіші настанови кінетичної теорії газів. Якщо відома функція розподілу частинок за швидкостями, то середнє значення деяких властивостей φ для частинок у точці з координатами r можна визначити як

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{n} \int \varphi \cdot f(c, r, t) \cdot d^3c$$

де $f(c, r, t)$ – функція розподілу, а інтегрування відбувається за всіма компонентами швидкості c ;

n – кількість частинок.

Середня швидкість молекул \bar{u} відповідно з (2.25) дорівнює

$$\bar{u} = \frac{1}{n} \int c \cdot f(c, r, t) \cdot d^3c,$$

де c – швидкість окремої молекули; характеризує рух газу як цілого. Якщо газ нерухомий, то \bar{u} дорівнює нулю, хоча кожна окрема молекула знаходиться в русі. Власна швидкість молекули c_0 не пов'язана з напрямком руху газу як цілого і може бути визначена співвідношенням

$$c_0 = c - u.$$

Середнє значення власної швидкості дорівнює нулю:

$$\bar{c}_0 = \frac{1}{n} \int c_0 \cdot f(c, r, t) \cdot d^3c = 0$$

Макроскопічні характеристики системи (температура, тиск, теплоємність та ін.) безпосередньо визначаються функціями (2.26), (2.27). Температура системи може бути визначена рівнянням

$$1/2m \cdot \bar{c}_0^2 = 3/2K \cdot T, \quad (2.28)$$

де $\bar{c}_0^2 = \frac{1}{n} \int c_0^2 \cdot f(c, r, t) \cdot d^3c$ – середнє значення квадрата власної швидкості частинок.

При визначенні температури за допомогою (2.28) розуміється, що стан системи відрізняється від рівноважного. Якщо таке відхилення значне, то поняття температури для всієї системи вводити немає рації. В системах, які складені з окремих підсистем, що слабо обмінюються енергією, можна ввести поняття температури для підсистем.

Розглянемо далі функцію розподілу частинок, визначення якої є головною задачею кінетичної теорії. Функцію розподілу можна знайти, якщо рішити рівняння Больцмана, яке уявляється як умова незмінюваності кількості частинок і має вигляд

$$\frac{\partial f}{\partial t} + C \frac{\partial f}{\partial r} + F \frac{\partial f}{\partial c} = I = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_c,$$

де c – швидкість частинок;

F – сила, яка діє на частинку;

I – інтеграл зіткнень молекул.

Ліва частина рівняння являє собою приріст у момент часу t кількості частинок в елементі об'єму за час dt внаслідок зміни положення точки в просторі та швидкості частинок, права частина враховує ті частинки, які внаслідок розсіювання потрапили в елемент об'єму.

У загальному вигляді I є інтегралом від різниці добутку функцій розподілення до і після зіткнення.

Через те що відхилення від рівноважності вважаються невеликими, то можна вважати функцією розподілу у вигляді

$$f = f_0 + c_x,$$

де x – відхилення системи від рівноважності

Функцію розподілу можна визначити за формулою

$$f = f_0 \cdot c \cdot \xi \cdot \tau \cdot \frac{\partial f}{\partial \xi} \cdot \frac{VT}{T}.$$

Знаючи f можна знайти параметри системи: потік тепла, коефіцієнт пропорційності, градієнт температури, коефіцієнт теплопровідності газу тощо.

2.3. Термічні напруження в гірських породах

Мінерали та гірські породи, як відомо, є поганими провідниками тепла, вони займають у ряду твердих тіл вузьку стрічку з малими значеннями теплопровідності – 0,1 – 0,7 Вт (м·К).

Під мінералом розуміють природне тіло, приблизно однорідне за хімічним складом і фізичними властивостями, яке утворилось внаслідок фізико-хімічних процесів у земній корі. До мінералів відносять усі самородні метали і неметали. Усього відомо біля 3000 різних мінералів. У більшості це тверді кристалічні хімічні з'єднання.

Гірські породи – це стійкі агрегати (парагенетичні асоціації) одного чи декількох мінералів, які утворюють самостійні геологічні тіла.

При нагріванні термічні напруження в гірських породах виникають за рахунок або неоднорідного нагрівання, або різниці в значеннях коефіцієнтів теплового розширення і пружних властивостей породи.

Так, якщо уявити стрижень завдовжки l , вільне розширення якого неможливе, то під час його нагрівання на ΔT в ньому виникають термічні напруження σ_m , що дорівнюють напруженням, які необхідні для стиску подовженого стрижня до початкових розмірів, тобто

$$\sigma_m = E \Delta l / l = E \alpha \Delta T. \quad (2.32)$$

Аналогічно можна розрахувати термічні напруження в деякому об'ємі породи, яка нагрівається і знаходиться у масиві, коли можливості розширення відсутні:

$$\sigma'_m = \gamma_m \cdot K \Delta T,$$

У цьому випадку об'єм, який нагрівається має напруження стиску; в той же час навколишні його об'єми, залежно від їх розташувань, мають напруження стиску і розтягу.

Якщо об'єм породи, який нагрівається, уявити у вигляді стрижня, що затиснутий з обох кінців іншими стрижнями тієї ж породи (рис. 2.3), то стрижні породи, які не нагріваються за відсутності можливості розширюватися, матимуть напруження стиску, які не будуть дорівнювати розрахованим за формулою (2.32), оскільки різна порода може до деякого ступеня пружно деформуватись, тобто (у випадку одномірної задачі) [8]:

$$\sigma_m = E_n (\alpha \cdot \Delta T - \xi), \quad (2.33)$$

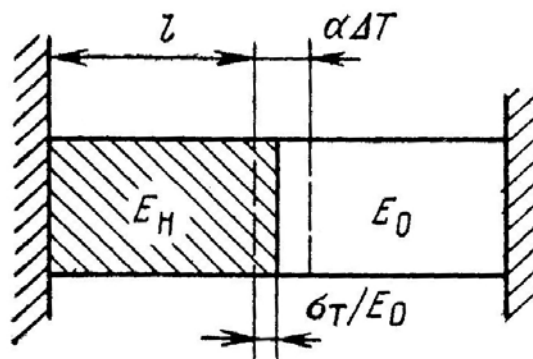


Рис. 2.3. Схема до розрахунку термічних напружень при послідовному розташуванні нагрітого E_n і ненагрітого E_0 об'ємів породи

де E_n – модуль пружності нагрітого об'єму;

ξ – відносна деформація нагрітого об'єму, яка обумовлена пружністю навколишньої породи ($\xi \approx \sigma_m / E_0$);

E_0 – модуль пружності не нагрітого об'єму (найчастіше $E_0 > E_n$).

Після перетворень (2.33) і прийнявши рівність нагрітого і ненагрітого об'ємів, одержимо

$$\sigma_m = \alpha \Delta T \cdot E_0 \cdot E_n / \alpha \Delta T \cdot E_{np},$$

або для випадку об'ємного напруженого стану

$$\sigma_m = \alpha \Delta T \cdot K_0 \cdot K_n / (K_0 - K_n) = \gamma_m \Delta T \cdot K_{np},$$

де K_0 і K_n – модулі об'ємного стиску відповідно ненагрітого і нагрітого об'ємів породи;

E_{np} і K_{np} – приведені модулі пружності гірських порід, які враховують зміни E і K із нагріванням, відносно розташування і величини нагрітого і ненагрітого об'ємів породи.

У зв'язку з тим, що термічні напруження визначаються добутком $E\alpha$ і $K\gamma_m$, їх залежність від внутрішніх факторів обумовлена залежністю модулів

пружності та коефіцієнтів розширення від цих чинників. Наприклад, зі збільшенням пористості порід термічні напруження зменшуються.

Якщо цілий зразок породи нагріти рівномірно, то в ньому можливі внутрішні, міжзернові термонапруження, обумовлені розрізненнями в пружних властивостях і коефіцієнтах теплового розширення окремих мінеральних зерен. Так, якщо два стикаючих кристали мають модулі Юнга, що дорівнюють E_1 і E_2 , а коефіцієнти лінійного розширення відповідно α_1 і α_2 , то в цих кристалах виникають термонапруження $\sigma_m^{\text{тн}}$, які приблизно можна розрахувати за формулою

$$\sigma_m^{\text{тн}} = (\alpha_1 - \alpha_2) \Delta T \cdot E_1 \cdot E_2 / (E_1 + E_2).$$

Якщо врахувати об'ємний напружений стан і можливу різницю в температурах включення T_1 і матриці T_2 , то радіальні термічні напруження у включеннях можна розрахувати за формулою

$$\sigma_m^{\text{тн}} = \frac{3E_1E_2 \cdot [\alpha_1(T_1 - T_2) + T_1(\alpha_1 - \alpha_2)]}{3E_2 \cdot (1 + \nu_1) + 2E_1 \cdot (1 - 2\nu_2)},$$

де індекс 1 належить до властивостей включень зерен у породи;
індекс 2 – до властивостей матриці.

2.4. Теплове розширення

У процесі нагрівання породи в ній виникає теплове розширення [9].

Коефіцієнти лінійного й об'ємного теплового розширення гірських порід є найважливішими теплофізичними характеристиками, які обумовлюють здатність породи трансформувати теплову енергію в механічну, тобто у зовнішню роботу.

Коефіцієнт лінійного теплового розширення α порід зменшується із зростанням енергії кристалічної решітки і відповідно щільності мінералів. Величина α порід знаходиться в межах $10^{-6} - 10^{-5} \text{ K}^{-1}$. У мінералів коефіцієнт теплового лінійного розширення знаходиться в межах від 10^{-6} до 10^{-4} K^{-1} (рис. 2.4).

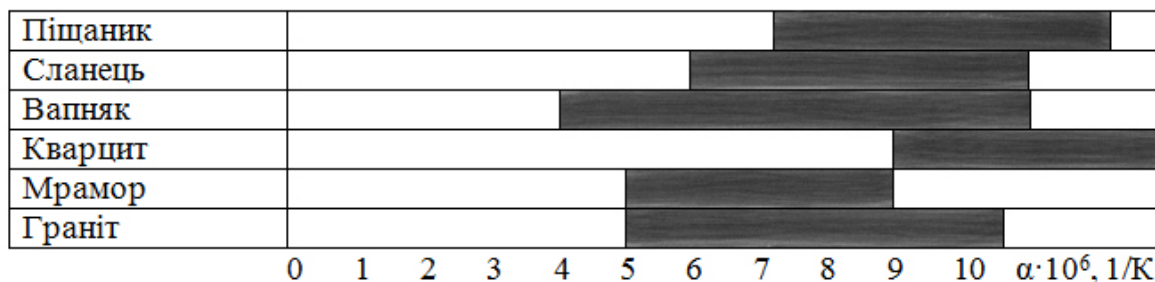


Рис. 2.4. Порівняння коефіцієнтів теплового розширення різних порід

Високими значеннями α володіють сірка ($8 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$), кам'яна сіль ($4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$), кварц ($1,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$).

Коефіцієнт об'ємного розширення γ_m полімінеральної гірської породи визначається значеннями γ_{mi} , величинами модулів всебічного стиску K_i , які

складені з мінералів, і відносним їх об'ємним вмістом V_i . Якщо порода при нагріванні зразу не руйнується, то

$$\gamma_m = \sum_{i=1}^n \gamma_{mi} \cdot K_i \cdot V_i / \left(\sum_{s=1}^n K_i \cdot V_s \right).$$

Звичайно $\gamma_m \approx 3\alpha$.

Таким чином, зв'язок між коефіцієнтом теплового розширення і мінеральним складом відбувається не безпосередньо, а через добуток параметрів γ_m К або α Е.

Великі значення параметра α Е відносяться, наприклад, до кварцу. Тому високі значення коефіцієнта теплового розширення характерні для кварцитів ($1,1 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$) і графітів ($0,8 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$).

Кристали і шаруваті гірські породи мають різноманітне теплове розширення в різних напрямках. Для них $\gamma_m \neq 3\alpha$. Монокристал кальциту під час нагрівання розширюється тільки в одному напрямку, а в інших напрямках він скорочується. Розширення кварцу в одному напрямку перевищує розширення його в інших у 2 рази.

Установлено вплив хімічного складу порід на їх теплове лінійне розширення.

Коефіцієнт лінійного теплового розширення α кварциту зростає зі збільшенням розмірів зерен. Це пов'язано зі зростанням сил поверхневого натягу при зменшенні розмірів зерен, які протидіють силам теплового розширення.

Пористість, тріщинуватість і пустоти в гірській породі ведуть до зниження її коефіцієнта теплового розширення.

Так, встановлена наступна залежність $\gamma_{m.сеп.}$ від пористості n :

$$\gamma_{m.сеп.} = \gamma_{m.o.} \sqrt{1-n},$$

де $\gamma_{m.o.}$ – коефіцієнт об'ємного теплового розширення мінеральної фази породи.

2.5. Вплив теплового поля

Вирізняють дві подоби теплового поля. Перша подоба пов'язана з виникаючими в породах термічними напруженнями через нерівномірне теплове розширення мінералів. Друга подоба обумовлена різними фізичними і термохімічними перетвореннями мінералів породи під час природного та штучного нагрівання.

Термохімічні та фізичні перетворення в гірських породах можуть бути такими [9]:

– висушування породи;

– перехід породи (вугілля, сланцю та ін.) з одного агрегатного стану в інший – підземна газифікація, плавлення, твердіння, випаровування чи зниження; сублімація;

– перехід мінералів з однієї кристалічної форми в іншу без зміни їх хімічного складу – поліморфні перетворення;

– дегідратація – видалення хімічно зв'язаної води з мінералів і гірських порід;

– дисоціація – руйнування мінералу з виділенням газоподібної фази (наприклад, декарбонатизація вапняків);

– окислювально-відновлювальні процеси.

Температури, за якими відбуваються ті чи інші фізичні та термохімічні ефекти, а також відповідна питома кількість теплоти, яка необхідна для їх здійснення, також є фізичними характеристиками порід і мінералів.

До них належать:

– температура $T_{пл}$ і теплота $Q_{пл}$ плавлення порід (наприклад, у галіту $T_{пл} = 1800$ К, $Q_{пл} = 530$ кДж/кг);

– температура і теплота сублімації мінералів;

– температура фазових перетворень (перехід α -халькозину в β -халькозин при $T = 380$ К);

– температура дегідратації (наприклад, у бокситовона складає 380 К);

– температура дисоціації (у доломіту $T_d = 1170$ К);

– температура і теплота згоряння (у антрациті $Q = 35$ МДж/кг).

Якщо у породі в якомусь діапазоні температур її нагрівання відсутні термохімічні явища, то в цьому випадку основну роль у зміні механічних властивостей порід грають термонапруження.

Експериментальні дані показали, що внутрішні термічні напруження можуть перевищувати 100 МПа, тобто досягти межі міцності породи на стиск чи зсуву (залежно від розташування включень). Наявність у породі різноманітних мінеральних зерен з різним співвідношенням α_i веде до появи максимумів межі міцності при стику деяких порід від ступеня їх нагрівання (рис. 2.5, а).

Досліди показують, що зміцнення в основному характерно для щільних дрібно-зернистих порід. Зростання міцності до температур 800° С виявлено у дрібно-зернистого пісковика (розмір зерен $d = 0,02 - 0,03$ мм) (рис. 2.5, б).

У багатьох крупнозернистих порід, наприклад гранітів, спостерігається зниження міцності з самого початку нагрівання (рис. 2.5, в).

При температурах вище 800° С майже у всіх породах починає переважати послаблення міцності.

Модуль Юнга більшості кристалічних порід з нагріванням поступово зменшується, в основному до температур 800 – 900 К (рис. 2.6). Коефіцієнт Пуассона з підвищенням температури зростає і наближається до 0,5.

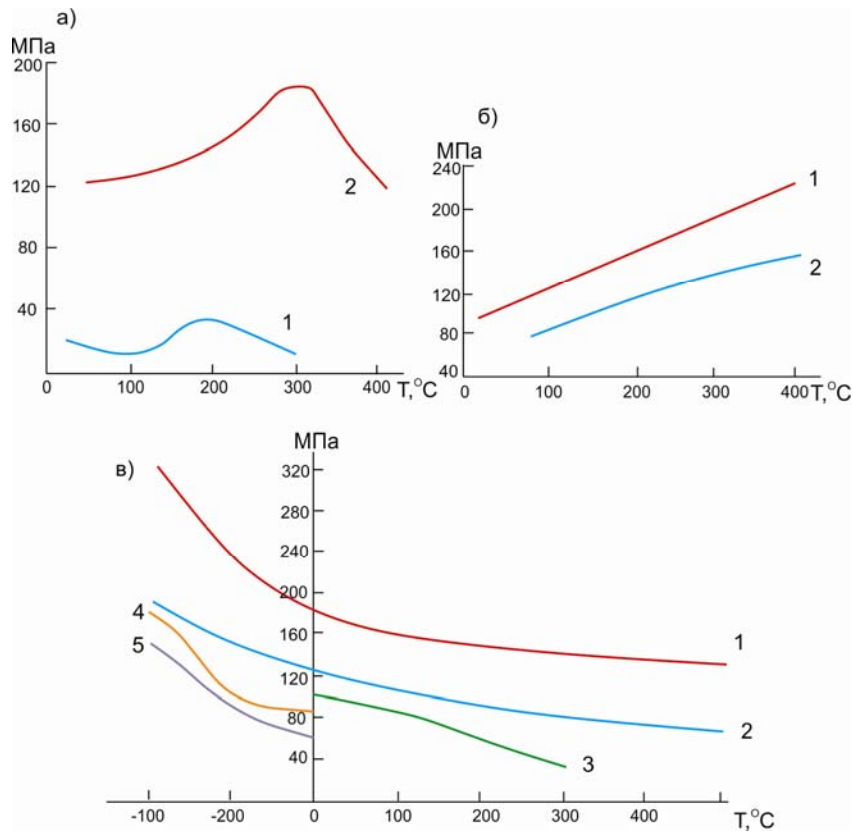


Рис. 2.5. Температурні залежності міцнісних властивостей гірських порід:
а – максимум на кривих $\sigma_{ст} = f(T)$: 1 – вугілля; 2 – дрібно-зернистий граніт;
б – зростання $\sigma_{ст}$ з нагріванням: 1 – халькозинова руда; 2 – ортит; в – зниження $\sigma_{ст}$ з нагріванням: 1 – залізистий кварцит; 2 – граніт; 3 – плавлений кварц;
4 – габро; 5 – лабрадорит

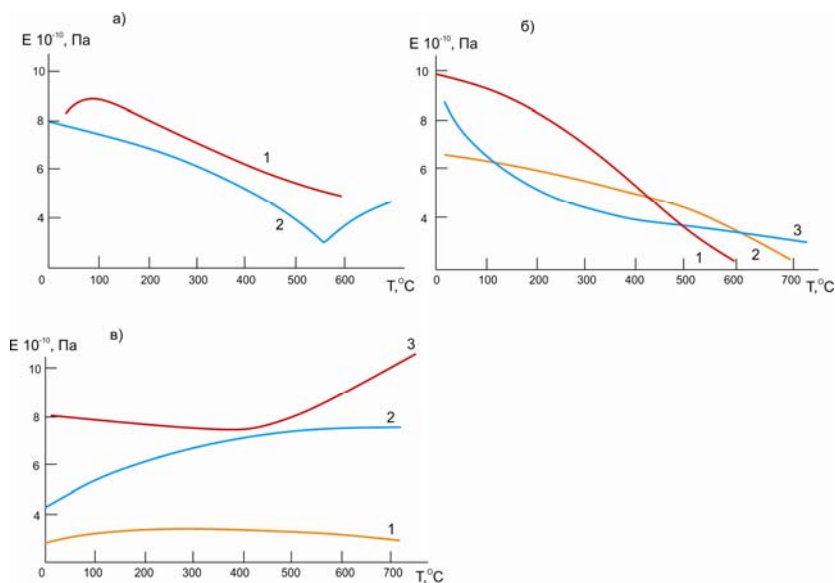


Рис. 2.6. Зміна модуля пружності E гірських порід залежно від температури:
а – наявність точок екструмума: 1 – нефелін; 2 – кварцит;
б – плавне зниження: 1 – габро; 2 – хлорит; 3 – рогова обманка;
в – плавне зростання: 1 – плавлений кварц; 2 – тремоліт; 3 – ангідрит

Фізичні та термохімічні ефекти в період нагрівання гірських порід частіше призводять до їх зміцнення. Однак деякі фазові переходи можуть викликати стрибкоподібне зростання механічних параметрів породи.

Так, для кварцовмісних порід (наприклад, кварцитів, пісковиків) існує точка мінімуму модуля міцності E біля температури 573°C , вище якої відбувається значне його зростання. Це пояснюється поліморфним перетворенням кварцу – переходом низькотемпературної тригональної модифікації кварцу (β -кварц) у високотемпературну гексагональну (α -кварц) (див. рис. 2.6, а).

Для аморфних (плавлених кварц) і деяких дрібнозернистих гірських порід (наприклад, тремоліт – воластонітовий скарн) характерно стійке зростання модуля Юнга (до 55 %) з підвищенням температури (див. рис. 2.6, в).

Глиняні породи, що мають водно-колоїдний характер зв'язку між частинками, з підвищенням температури спікаються, зміцнюються, і тому їх параметри міцності та пружності зростають у декілька разів.

У всіх випадках, коли високі температури призводять до вигорання породи (вугілля, вуглисті аргіліти, сланці), спостерігається зниження міцності та модулів пружності зі зростанням температури [7].

Модуль зсуву G порід із зростанням температури поступово зменшується і при температурах плавлення стає дорівнювати нулю.

Якщо нагрівання породи не веде до необоротних змін в її складі чи структурі, то під час охолодження відновлюються параметри пружності. Те ж спостерігається і в кварцовмісних породах, бо перехід β -кварцу в α -кварц – явище оборотне.

Всі параметри порід, які характеризують їх пластичність, повзучість, релаксацію напружень, з підвищенням температури зростають. В'язкість порід з нагрівом знижується.

Підвищення температури змінює швидкість розповсюдження пружних хвиль, подібно зміні модуля пружності E . В більшості випадків спостерігається зниження v_p з підвищенням температури і зростання коефіцієнта поглинання Θ

(рис. 2.7). Додаткове зростання зовнішнього тиску веде до зниження впливу температури на акустичні властивості порід.

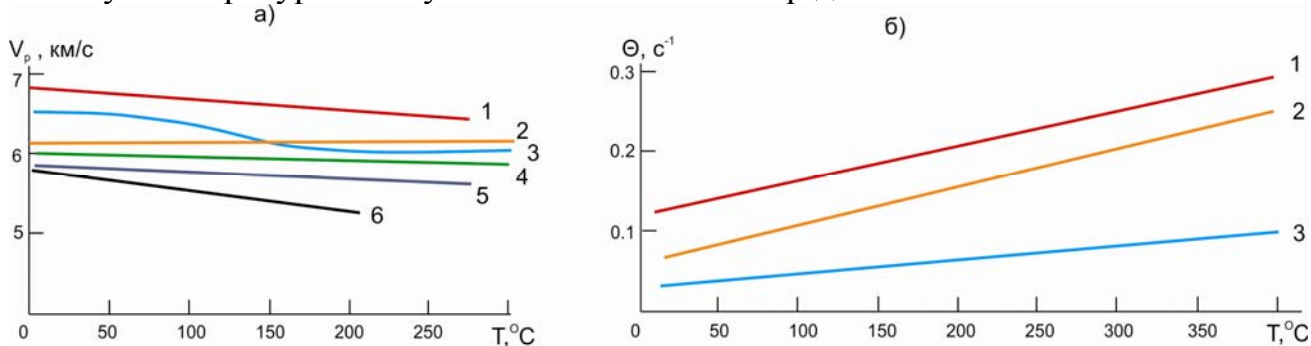


Рис. 2.7. Зміна акустичних параметрів порід з нагрівом:

а – швидкості поздовжніх хвиль v_p :

1 – діабаз; 2 – плавлений кварц; 3 – вапняк; 4 – кристалічний кварц;
5 – граніт; 6 – серпентиніт; б – коефіцієнта поглинання Θ при $v P_{\sigma} = 1000 \text{ МПа}$:

1 – граніт; 2 – андезит; 3 – діабаз

Вплив від'ємних температур на механічні властивості порід частіше всього має протилежний нагріву характер. Зниження температури викликає в більшості випадків підвищення міцності порід (див. рис. 2.5, в), модулів пружності, твердості, зниження пластичних і реологічних характеристик.

Основним прикладом цих процесів у скельових породах є сумарні стискаючі термонапруження.

У вологих зв'язних і пухких породах основну роль грає замерзання води у порах і пустотах порід, яке призводить до утворення кріогенної текстури. Характерною особливістю кріогенних текстур є їх руйнування при 0° С і стрибкоподібна зміна всіх властивостей породи в цій області температур [10].

Зміна температури породи веде до зміни не тільки її міцності, але й механізму руйнування. Підвищення температури сприяє проявам пластичного характеру руйнування порід, зниження – крихкого.

Тому термодинамічне навантаження охолоджених скальних порід викликає більш ефективне їх руйнування. Так, питома робота руйнування габро-діабазу і різноманітних пісковиків при температурах нижче – 150° С в

4 – 6 раз менш роботи руйнування при нормальній температурі, не дивлячись на те, що межа міцності цих порід при низьких температурах σ_{cm} зростає в 1,1 – 1,7 рази.

Зміцнюючий і розпушуючий ефекти, які виникають у процесі нагрівання чи охолодження гірських порід, призводять до остаточних змін їх властивостей. Так, міцність фосфоритових руд, рівномірно нагрітих до температури 500° С і після того охолоджених, знижується на 30 – 40 %; енергоємність руйнування неокислених залізистих кварцитів змінюється залежно від температури попереднього нагрівання. Породи, які схильні до значних проявів пластичних деформацій в процесі нагрівання (наприклад, габро) мають підвищену енергоємність руйнування після нагріву.

Ефект розпушення порід після нагрівання чи глибокого охолодження підсилюється в процесі швидкої динамічної дії теплового поля у породі. Це пов'язано з великою неоднорідністю теплового поля у породі, яка призводить до підвищення в ній термонапружень.

Об'єм тріщин V_{mp} , які виникають від термонапружень та призводять до розпушування породи, може бути приблизно підрахований за формулою

$$V_{mp} \approx C \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T,$$

де C – концентрація включень у породі мінеральних зерен, коефіцієнт лінійного теплового розширення яких α_1 ; $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$;
 α_2 – коефіцієнт лінійного розширення матриці породи.

Так, для пари мінералів плагіоклаз – кварц (це можливо для граніту) $\Delta\alpha$ складає $3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, і в процесі нагрівання до 600 ° С в них виникають внутрішні термонапруження, які призводять при концентрації кварцу у породі біля 20 % до утворення тріщин загальним об'ємом 0,36 %, що, враховуючи їх форму, досить суттєво відбивається на міцності породи.

З підвищенням температури змінюються також гідравлічні властивості й ефекти дії рідин на гірські породи. Наприклад, розчин мінералів з підвищенням температури може як зростати (у галогенів), так і зменшуватися (у магнезиту) (рис. 2.8).

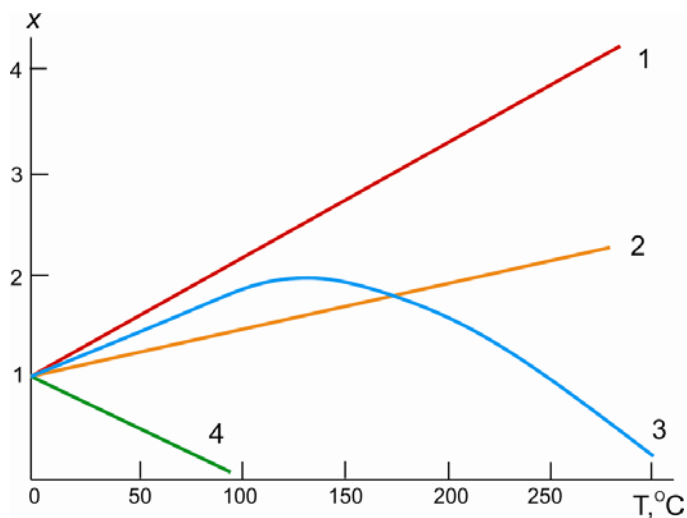


Рис. 2.8. Зміна відносної розчинності мінералів зі зростанням температури T :
1 – сильвініт; 2 – галіт; 3 – сульфідів і карбонатів; 4 – магнезит

Підвищення температури порід впливає на теплові й електромагнітні властивості порід через зростання кінетичної енергії частинок, які коливаються у породах з більшою інтенсивністю та хаотичністю. Коливання іонів у кристалічній решітці призводить до їх більшої взаємодії та зниженню теплопровідності багатьох кристалічних мінералів і порід (рис. 2.9).

При цьому спостерігається відповідність теплопровідності відомій формулі:

$$A = \lambda \cdot T,$$

де A – деяка постійна, яка дорівнює для щільних вивержених і метаморфічних порід (кварцитів, гранітів, пегматитів) 1100 – 1900 Вт/м.

Така закономірність зміни λ з температурою спостерігається тільки в області до 400 °С. При більш високих температурах теплопровідність λ прагне до постійного значення, а для деяких порід відмічено навіть зростання λ .

Теплопровідність порід, які мають значну пористість (вапняки й ін.) з підвищенням температури змінюється незначно [10].

Теплопровідність аморфних мінералів і порід (SiO_2) з підвищенням температури зростає, також зростання спостерігається й у вугілля і глини. Це пов'язано з великою порушеністю кристалічної решітки порід при вихідних температурах.

Якщо в процесі нагрівання у породах відбуваються фазові зміни, то на кривій залежності $\lambda = f(T)$ таких порід виникають області максимумів чи мінімумів. Наприклад, вапняки мають область мінімуму λ при температурах 300 – 400° С.

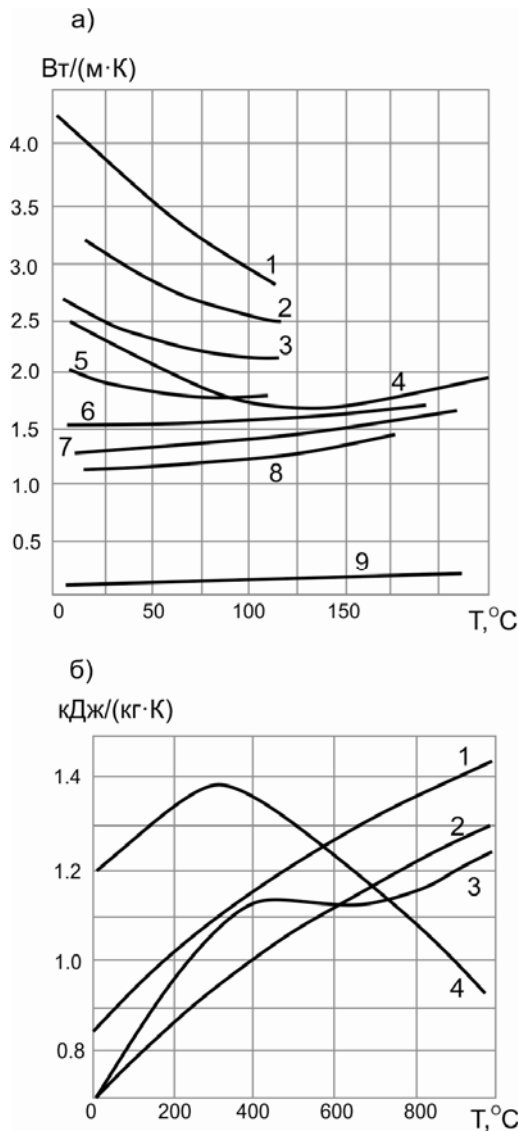


Рис. 2.9. Залежність теплових властивостей гірських порід від температури:

а – коефіцієнт теплопровідності λ :

1 – доломіт; 2 – граніт; 3 – кварцовий монзоніт; 4 – вапняк; 5 – сієніт;
6 – анортозит; 7 – плавлений кварц; 8 – діабазове скло; 9 – вугілля;

б – питомої теплоємності C :

1 – базальт; 2 – діабаз; 3 – кварцит; 4 – кам'яне вугілля

Під час зростання температури вологих порід волога випаровується. Тому криві теплопровідності таких порід у процесі нагрівання до 200 – 300° С мають область максимуму: спочатку, через те що теплопровідність води зі зростанням температури підвищується, зростає λ усієї породи, а потім у процесі випаровування вологи відбувається зниження теплопровідності.

Теплопровідність α кристалічних порід із зростанням теплопровідності аморфних порід, вугілля і глини з підвищенням температури зростає (рис. 2.10). Найбільше зниження α із зростанням температури спостерігається у гранітів, найменше у базальтів. Так, якщо при 400 К температуропровідність базальтів у 2,5 рази нижче ніж у гранітів, то при 1200 К температуропровідність обох порід зрівноважується (див. рис. 2.10).

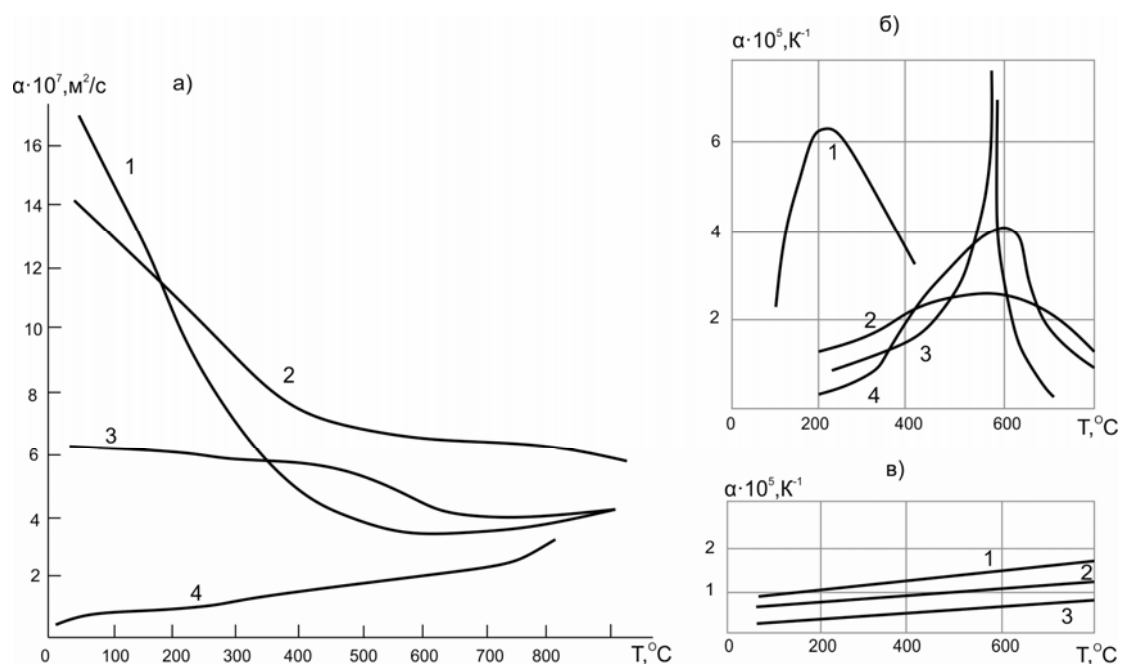


Рис. 2.10. Температурні залежності теплових властивостей гірських порід:
 а – теплопровідність α гірських порід:
 1 – граніт; 2 – піроксеніт; 3 – базальт; 4 – вугілля;
 б – коефіцієнтів α теплового розширення мінералів, які мають область максимуму: 1 – пірит; 2 – кальцит; 3 – кварц; 4 – серпентиніт;
 в – коефіцієнтів α теплового розширення порід, що не мають максимуму:
 1 – нефеліновий сієніт; 2 – діорит; 3 – габро.

Коефіцієнти лінійного теплового розширення α більшості твердих тіл із підвищенням температури зростають. У багатьох мінералів спостерігаються аномалії коефіцієнта α , які обумовлені термічними змінами. Найбільш відомий чіткий максимум коефіцієнта лінійного теплового розширення кварцу і кварцовмісних порід в області 573°C (див. рис. 2.8), який пов'язаний з поліморфним перетворенням β -кварцу в α -кварц.

Плавні максимуми α в області $400 - 600^\circ \text{C}$ характерні для ангідриту, сидериту, кальциту, а в області 200°C – для піриту.

Температурні залежності α багатьох мінералів, у яких не відбуваються фазові зміни (див. рис. 2.8), мають прямі лінії типу

$$\alpha = \alpha_0 \cdot (1 + b' \cdot T),$$

де α_0 – коефіцієнт лінійного теплового розширення при $T = 0^\circ \text{C}$.

У більшості мінералів температурний коефіцієнт $b' = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$.

Тому, не дивлячись на зменшення модуля пружності E зі зростанням температури параметр αE , який визначає величину термодинамічних напружень у породах, зростає, або α значно збільшується з підвищенням температури. Так, при зміні температури від 60 до 600°C величина αE зростає у гранодіориті у 3,3 рази, у кварцового порфіру – в 20,5 разів.

Коефіцієнт об'ємного теплового розширення порід і мінералів із підвищенням температури також зростає (табл. 2.1)

Таблиця 2.1

Значення коефіцієнта об'ємного теплового розширення γ_m
при різних температурах

Мінерал	$\gamma_m \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$ при температурі $^{\circ}\text{C}$			$\frac{\gamma_{m800}}{\gamma_{m20}}$
	20	400	800	
Плагіоклаз	18	27	33	1,82
Рогова обманка	23	28	33	1,43
Олівін	27	31	31	1,15
Діопсид	24	28	32	1,33
Кварц	34	69	– 3	– 0,09

За наявності у мінералах фазових переходів спостерігаються значні зміни γ_m порід зі зростанням температури. Наприклад, у кварцу і магнетиту після відповідних переходів через критичні точки γ_m сильно зменшується (у кварцу відбувається навіть відносне зменшення його об'єму).

Коефіцієнт тепловіддачі α_m порід зі збільшенням температури зростає, найбільш суттєво – у кварциті (в 4 рази під час нагрівання зі 100 до 600 $^{\circ}\text{C}$), а слабкіше усього – у габро.

Рухливість іонів у діелектриках із зростанням температури збільшується, зростає їх кінетична енергія. Тому електрична провідність діелектрика зростає.

Залежність електричної провідності σ_e чистого діелектрика від температури визначається формулою [10]:

$$\sigma_e = \sigma_{e0}^{exp} [-Q_e / (k \cdot T)],$$

де σ_{e0} – деяка постійна, см/м;

Q_e – ширина забороненої зони, яка являє собою енергію активації, що необхідна для вирівнювання іону, Дж;

k – постійна Больцмана ($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

T – абсолютна температура, К (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Значення Q_e і σ_{e0} для деяких гірських порід

Порода	$Q_e \cdot 10^{19}$, Дж	σ_{e0} , см/м	Порода	$Q_e \cdot 10^{19}$, Дж	σ_{e0} , см/м
Граніт	0,89 – 1,47	$0,5 - 4 \cdot 10^{-3}$	Габро	1,79 – 2,72	$10^{-2} - 10^{-5}$
Гнейс	0,96	$10^{-2} - 10^{-7}$	Дуніт	1,12	$9 \cdot 10^2$
Базальт	0,89 – 2,15	$0,4 - 6 \cdot 10^{-5}$	–	–	–

При підвищенні температури до 600 $^{\circ}\text{C}$ електричний опір порід зменшується від 20 до 10^9 разів.

Зростання температури вологої пористої породи викликає випаровування вологи, внаслідок чого залежність електричного опору починає відрізнятися від експотенціальної.

Частіше за все підвищення температури порід до 200° С призводить до деякого зростання опору (за рахунок висушення) і тільки в подальшому починається його зниження. Наприклад, у кам'яного вугілля (буре, жирне, газове) і горючих сланцях до температури 50 – 100° С опір зменшується, а при подальшому зростанні температури до 200 – 300° С – зростає.

2.6. Вплив тиску на гірські породи

Основною причиною зміни властивостей порід під впливом дією є порушення первісної будови порід. Залежно від характеру тиску це або ущільнення породи, зминання пор і збільшення площі контакту зерен, або утворення системи тріщин у процесі розвантаження, зниження зв'язків між окремими її ділянками тощо. Найбільша ущільнююча дія на породи утворюється при підвищеному гірському тиску в зонах IV, VII, VIII (див. розділ 3) у процесі газифікації твердих корисних копалин, а також гідростатичному тиску, під дією якого в гірських породах виникають залишкові деформації, які призводять до зниження пористості [6].

Так, глинисті породи під тиском $P_{\sigma} = 100$ МПа знижують свою пористість з 50 до 7 %. З ущільненням зростають площі перетину, за якими передаються тиск і енергія, і тому зростають всі тендерні параметри – міцність, пружні властивості, теплопровідність тощо. Одночасно зменшуються площі перетину каналів (пор, тріщин і т.п.), і тому такі параметри, як вологоємність і проникність знижуються.

Під дією розпушуючих механічних напружень відбувається, навпаки, зменшення внутрішніх зв'язків між частинками гірських порід. При цьому зміни властивостей, зазвичай, більш суттєві. Значно зменшується тертя, зчеплення зерен між собою, міцність порід, знижуються параметри пружності, крихкості твердості, зростає подрібнюваність порід.

Так, модуль пружності $E_{ст}$, який визначається під час стиснення звичайно в 1,5 – 4 рази вище модуля пружності E_p , який визначається в процесі розтягу.

Через те що закриття пор і супровідне цьому збільшення кількості та площі контактів зерен під час стиснення в основному завершуються при тиску 50 – 100 МПа, найбільш суттєве зростання (до трьох разів) модуля пружності більшості порід спостерігається до цих тисків (рис. 2.11). При подальшому зростанні тиску майже до 1000 МПа зростання модуля пружності загальмовується. Яскравим прикладом таких стиснень є деформації порід навколо підготовчих виробок у шахтах, коли опорний тиск виникає з обох боків виробки й призводить до повного подрібнення порід довкола контуру підготовчої виробки на відстані 2 – 3 м від контуру.

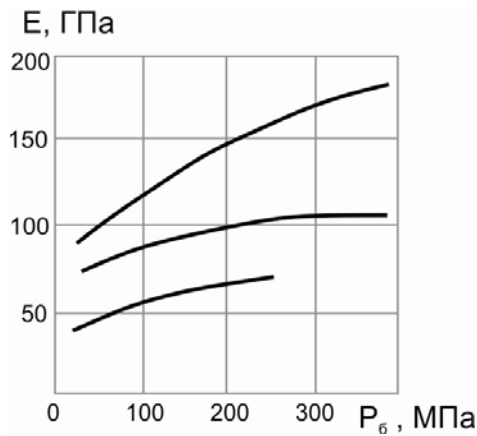


Рис. 2.11. Зміна модуля пружності E габро (1), базальту (2) і пісковика (3) з підвищенням тиску

Оскільки зі зростанням тиску збільшуються параметри пружності, то одночасно спостерігається і зростання швидкостей розповсюдження пружних хвиль (рис. 2.12), особливо у пористих і нещільних породах. Наприклад, у піщаного мергелю з початковою пористістю 25 % швидкість розповсюдження поздовжніх хвиль v_p у період все стороннього тиску до 100 МПа зростає на 50 – 60 %, у той же час як у менш пористих порід вона зростає не більш ніж на 20 % (з підвищенням тиску до 400 МПа v_p для габро зростає на 5 – 7 %, для граніту – на 10 – 20 %).

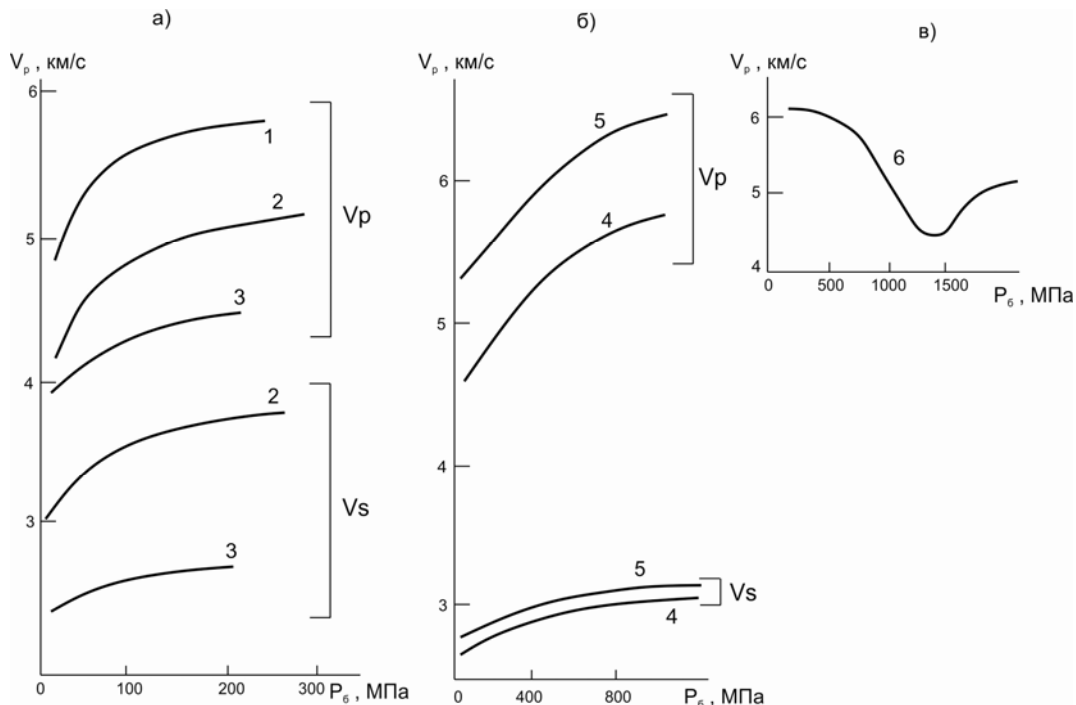


Рис 2.12. Вплив на швидкість поздовжніх v_p і поперечних v_s пружних хвиль всебічного тиску P_σ (а); тиску і вологості (б); тиску і поліморфних переходів (в): 1 – вапняк; 2 – пісковик; 3 – сланець глинястий; 4 – сухий біотитовий граніт; 6 – кальцит

Зростання швидкості розповсюдження поперечних хвиль з підвищенням тиску відбувається повільніше.

У низці випадків через виникнення поліморфних переходів у породах в області високого тиску можливі інші закономірності зміни v_p з тиском. Наприклад, v_p кальциту з навантаженням зменшується до значень тиску 1500 МПа, а потім через поліморфний перехід зростає.

Збільшення всебічного тиску на породу знижує її анізотропність, і тому відношення v_{11}/v_1 зі зростанням тиску зменшується.

Порівняння зміни швидкостей поширення пружних хвиль з навантаженням у насичених водою зразках і сухих показує якісне повторення зміни v_p і практично повне спів падання кривих v_s для сухих і вологих порід.

Коефіцієнт поглинання пружних хвиль з підвищенням тиску зменшується (у пористих породах на 15 – 35 %) (рис. 2.13), а питомий хвильовий опір зростає. Однак якщо є фазові перетворення (наприклад, кам'яне вугілля трансформується в генераторний газ), то можлива інша залежність Θ від тиску, як це встановлено для вапняку (рис. 2.13).

Міцність порід значно зростає під час переходу від одновісного стиснення до дво- і тривісного (рис. 2.14).

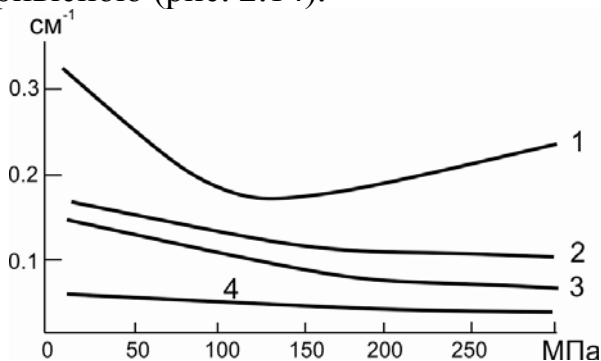


Рис. 2.13. Зміна коефіцієнта поглинання Θ поздовжніх пружних хвиль від тиску σ : 1 – вапняк; 2 – граніт; 3 – гнейс; 4 – габро

Під час всебічних стискних навантажень міцність порід з підвищення тиску продовжує зростати, а відношення σ_{cm}/σ_p зменшується. Наприклад, межа міцності при стиску дрібнозернистого вапняку, який складає у разі нормального атмосферного тиску 260 МПа, при тиску 1000 МПа досягає

1300 МПа. Сильно зростають також межі міцності порід під час зсуву. Міцність порід при згині у більшості порід під час тиску 300 МПа зростає в 10 – 15 разів.

При зростанні тиску значно збільшуються також пластичні і реологічні параметри порід [7].

Здатність до пластичних деформацій у вапняків та алевролітів проявляється вже під час всебічного стиснення біля 50 МПа, а у ангідритів – біля 10 МПа. Пластичні деформації пісковика можливі під час тиску вище 400 МПа.

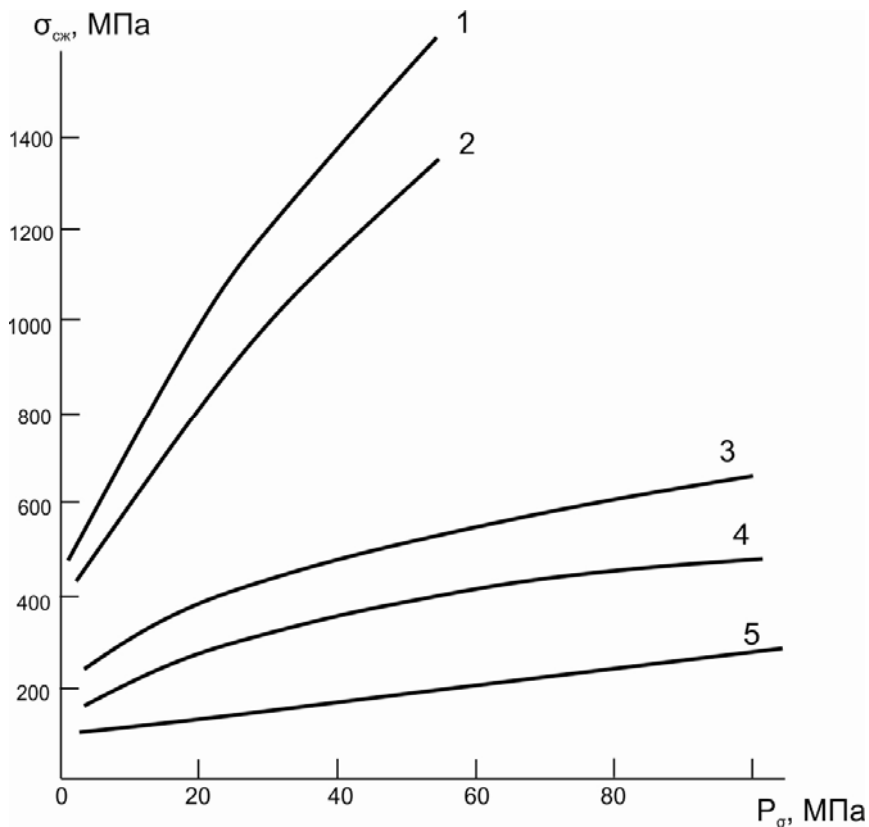


Рис.2.14. Зміна межі міцності при стисненні зі збільшенням гідростатичних навантажень P_{σ} (1 – діабаз; 2 – базальт) і при двовісних стискаючих навантаженнях $\sigma_2 = \sigma_3$ (3 – габро; 4 – доломіт; 5 – вапняк мармурований)

Пластичні деформації при досить значному всебічному стисненні пояснюються тим, що в цих умовах більш легше можуть проявлятися внутрішньо та міжзернові рухи і зміщення, які не призводять до порушеності суцільності.

Суттєвий вплив на механічні властивості порід чинить характер прикладання механічних навантажень до порід – статичний чи динамічний.

У процесі динамічних навантажень спостерігаються більш високі значення параметрів пружності, міцності, тривкості, твердості, в'язкості порід, знижують значення пластичності (рис. 2.15).

Модуль поздовжньої пружності, наприклад, визначений при статичних навантаженнях E_{cm} , звичайно є меншим модуля E_{∂} , який виміряний під час динамічної дії на породу. Різниця між статичним і динамічним модулями пружності досягає 35 % і більше, причому максимальні відмінності припадають на пористі породи.

Встановлена, наприклад, наступна кореляційна залежність між E_{cm} і E_{∂} для порід, у яких $E_{cm} < 5 \cdot 10^5$ МПа:

$$E_{\partial} = 0,83 \cdot E_{cm} + 0,97 \cdot 10^{10}.$$

Для окварцьованих порід

$$E_{\partial} = 0,91 \cdot E_{cm. \text{ зг. }} + 2,46 \cdot 10^{10}.$$

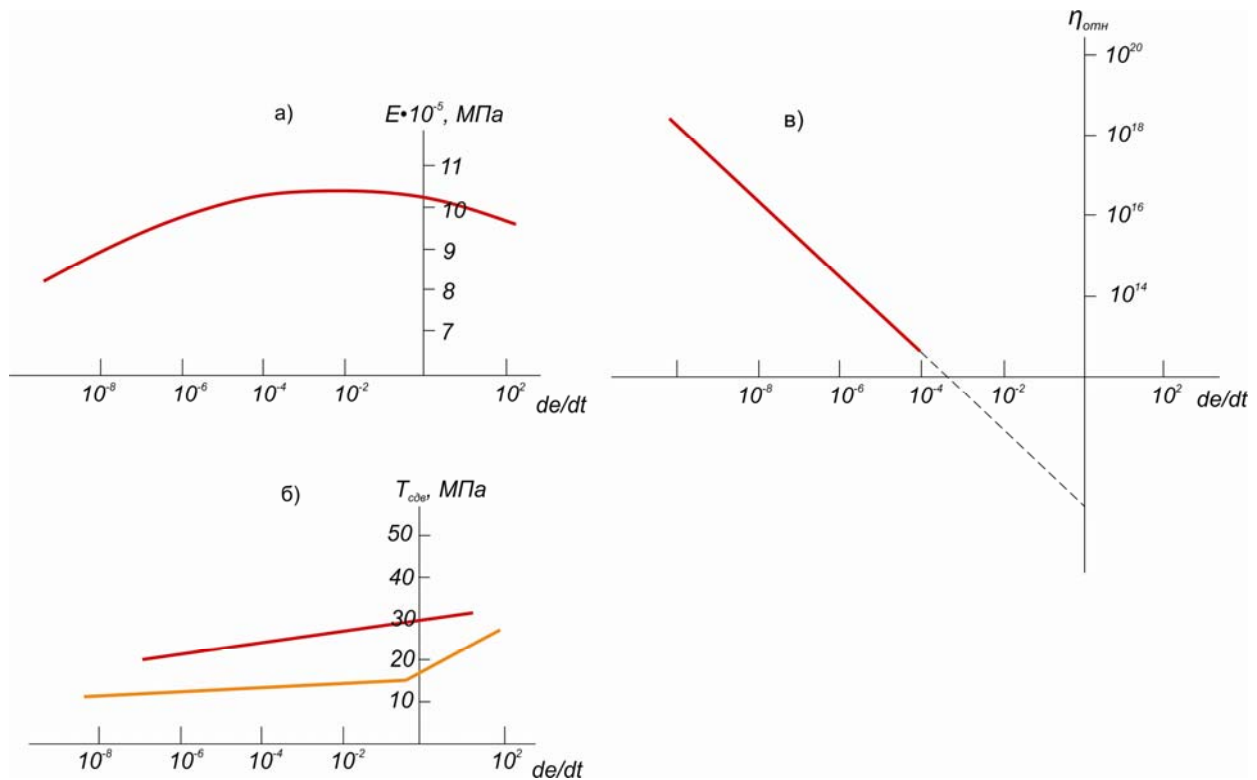


Рис. 2.15. Залежність механічних властивостей гірських порід від швидкостей навантаження і деформування; модуля Юнга (а); межі міцності під час зсуву (б) діабазу [$1 - \sigma_2 = 0$; $2 - \sigma_2 = 50 \text{ МПа}$ і відносній в'язкості η_{vih} (в); σ_2 – боковий тиск]

Основні причини різниці між величинами E_{cm} і E_d – це пружний наслідок і релаксаційні явища, які супроводжують статичні навантаження, а також особливості макробудови (пористість, шаруватість, тріщинуватість), які сприяють деформації порід при великих статичних навантаженнях. Тому для деяких порід спостерігається практичне збігання модулів E_{cm} і E_d (при тисках біля 30 % від руйнівних). Характерно, що при динамічних вимірах коефіцієнт анізотропії модуля Юнга у шаруватих породах більше ніж при статичних навантаженнях [7].

При підвищенні всебічного тиску до 100 МПа E_d зростає повільніше ніж E_{cm} , лише на 50 – 60 %.

Експериментальні дані показують зростання динамічної межі міцності під час стиснення $\sigma_{cm. d.}$, у порівнянні з величиною $\sigma_{cm. cm.}$, від 10 – 15 до 200 %. Так, у процесі зміни швидкості нарощення напружень від 1,9 до 4,0 МПа величина $\sigma_{cm.}$ гранітів зростає від 150 до 170 МПа. При цьому одночасно спостерігається зменшення енергоємності руйнування. Це пояснюється крихким характером руйнування порід при швидких навантаженнях.

Як відомо, процес руйнування вимагає деякого часу для свого завершення. В період малого часу прикладання навантаження, який є недостатнім для повного розвитку процесу руйнування, необхідно його інтенсифікувати шляхом збільшення навантаження.

Під час статичних навантажень створюються більш сприятливі умови для розвитку пластичних деформацій у породі. Тому необхідні для руйнування зусилля у цьому випадку є меншими ніж у процесі динамічної дії, однак питома робота руйнування може бути більшою. Наприклад, при швидкості v удару долота по породі, який дорівнює 3 м/с, питома робота руйнування базальту складає $A = 1600 \text{ МДж/м}^3$, у той час при $v = 22 \text{ м/с}$ $A = 400 \text{ МДж/м}^3$.

Оскільки крихке руйнування порід пов'язано з утворенням тріщин, то для оцінювання зруйнованості порід необхідно знати швидкість тріщиноутворення порід $v_{тр}$. Ця величина значно більше швидкості розвитку пластичних деформацій і визначається параметрами пружності порід.

Встановлено, що при коефіцієнті Пуассона $\nu \approx 0,25$ $v_{тр} \approx (0,3 - 0,4) \cdot \sqrt{E/\rho}$ (тобто в 2,5 – 3 рази менше швидкості поширення пружних хвиль). В апатитових рудах, наприклад, $v_{тр} = 400 - 1500 \text{ м/с}$, у гранітах – $1400 - 1800 \text{ м/с}$, у мраморі – $1200 - 1600 \text{ м/с}$, у вапняці – $800 - 1200 \text{ м/с}$. Якщо швидкість прикладання навантажень $v > v_{тр}$, руйнування породи взагалі може не відбутись.

При нагріванні породи теплова енергія витрачається як на підвищення внутрішньої енергії породи, так і на виконання зовнішньої роботи, тому теплоємність c_p , яка визначена при постійному тиску, звичайно трохи вище теплоємності c_v , яка визначена при постійному об'ємі, бо виникають витрати енергії на подолання тиску.

Різниця між c_p і c_v для гірських порід невелика (5 – 15 % при невеликих температурах).

Температуропровідність порід із підвищенням тиску зростає також незначно.

Всебічний тиск, звичайно, збільшує теплопровідність корисних порід і зменшує їх коефіцієнти теплового розширення. Це пов'язано з тим, що відбувається ущільнення порід, покращуються умови передачі тепла у породі, а можливість розширення породи знижується.

Залежність коефіцієнта теплопровідності порід від тиску описується формулою:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot (1 + \beta \cdot \sigma),$$

де β – коефіцієнт, для осадочних порід дорівнює $2,78 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$, для вивержених кристалічних порід – $1,16 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$,

λ_0 – коефіцієнт теплопровідності породи при відсутності тиску.

Вплив тиску на електричний опір гірських порід неоднаковий і залежить від вмісту рідин і газів у породі. Найчастіше зі зростанням навантаження спостерігається зменшення опору сухої чи слабконасиченої вологою породи (рис. 2.16), що пояснюється зниженням її пористості та покращенням контактів між частинками.

Крім того, при невеликому вмісті води у породі звичайно не всі пори заповнюються водою. Під тиском заповнені водою пори змикаються й утворюють безперервні електропровідні канали, що також призводить до зменшення електричного опору.

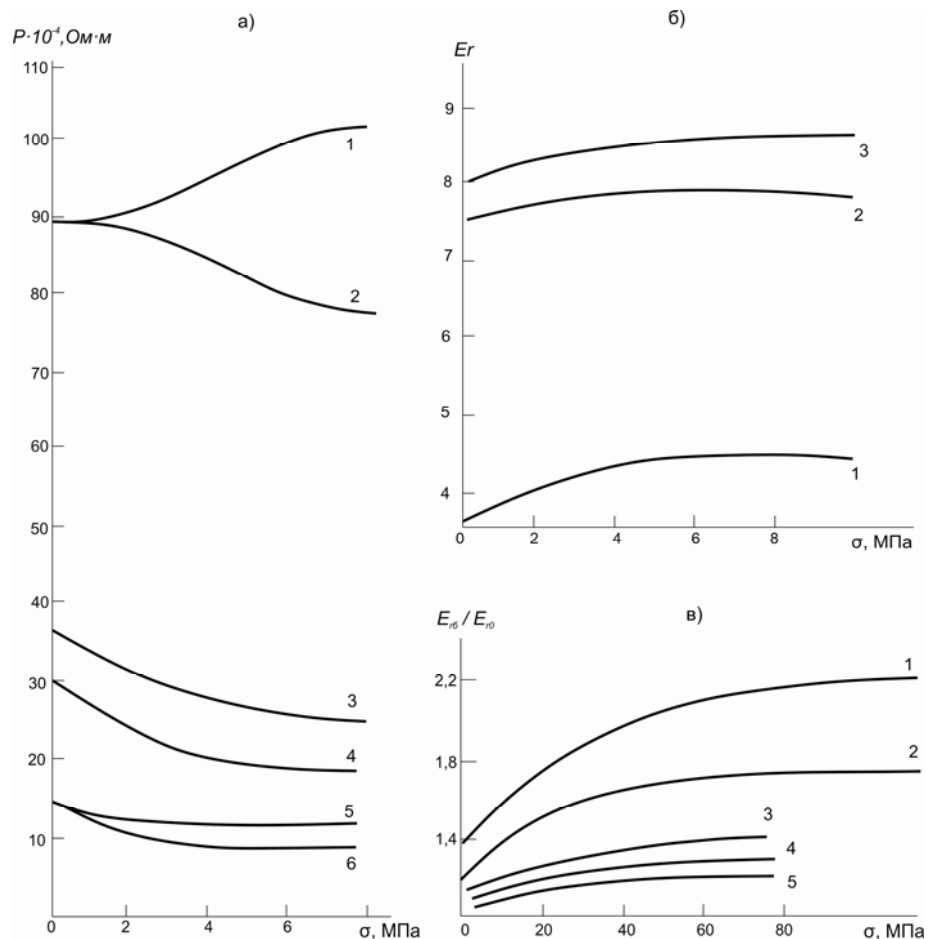


Рис. 2.16. Вплив тиску на електричні властивості гірських порід:
а – зміна ρ_e кам'яного вугілля: 1 – вугілля великої вологості ($w = 13,2\%$ при одновісному напруженому стані); 2 – те ж саме при $\sigma_{\delta iч} = 7$ МПа; 3 – слабо насичене вугілля; 4 – вугілля потужного пласта $m > 6$ м; 5 – вугілля при $\sigma_{\delta iч} = 0$; 6 – вугілля при $\sigma_{\delta iч} = 7$ МПа; б – зміна ζ_e - потужних пластів: 1 – $w = 0,1\%$; 2 – $w = 0,25\%$; 3 – $w = 0,32\%$; в – приращення $\zeta_{2\sigma}/\zeta_{20}$ у пісковнику; сієніту (2), гранітах (3,4, 5)

У більшості гірських порід найбільш інтенсивні зміни опору (в 1,2 – 2 рази) спостерігаються під час зростання механічних однобічних напружень от 10 до 60 МПа.

Можливий і інший характер залежності $\rho_e = f(\sigma)$. Так, питомий електричний опір ρ_e деяких глин при зростанні тиску до 10 МПа збільшується через витискування води із пор і зменшення перерізу порових каналів, заповнених водою. Сильно вологі вугілля зі зростанням тиску також збільшують свій електричний опір (див. рис. 2.12).

Зростання тиску викликає деяке збільшення діелектричної проникності сухих пористих порід за рахунок ущільнення мінерального скелету; цей ріст найбільше значний до тиску 100 МПа (див. рис. 12.16). Наявність води якісно цю залежність не змінює.

Зі зростанням одновісного тиску магнітна сприйнятливість порід у напрямку паралельному стисненню звичайно зменшується (рис. 2.17). А в напрямку, перпендикулярному стисненню, величина α спочатку швидко зростає, а при подальшому стисненні не змінюється. Під час всебічного тиску на магнетит виявлена зміна характеру дії тиску α у процесі фазового переходу в області 60 МПа. Залишкова намагніченість зі зростанням тиску зменшується.

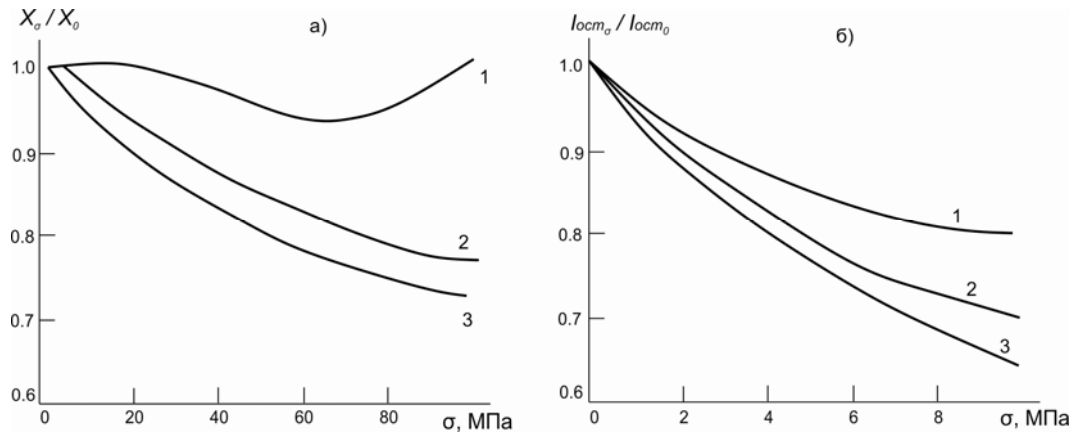


Рис. 2.17. Зміна магнітних властивостей порід від тиску: а – магнітна сприйнятливість α_σ/α : 1 – монокристал магнетиту; 2, 3 – залізисті кварцити паралельно шаруватості; б – відносне залишкове намагнічування I_{ocm}/I_{ocm_0} : 1 – туфобрекчія; 2 – магнетит; 3 – діабазовий порфірит.

3. Технологічні основи підземної газифікації вугілля

3.1. Сутність розкриття родовищ твердих горючих копалин

Розкриття родовищ – створення гірничих виробок, які забезпечують доступ до корисної копалини з поверхні Землі та призначені для його наступної підготовки і розробки геотехнологічними методами [11].

Будівництво геотехнологічних комплексів починається з буріння свердловин, які є основними розкривальними виробками.

У продуктивний пласт по свердловинах подають спеціальні реагенти (технічна вода, повітря, кисень, пара, теплоносії, кислоти, луг і ін.) і опускають технологічне устаткування для ефективної дії на поклад (механічним, хімічним, гідравлічним, мікробіологічним, термічним і іншими способами), яка забезпечує переведення корисних копалин у рухомий (міграційний) стан і видобування на поверхню продуктивних флюїдів.

Розкриття родовищ здійснюється вертикальними, похилими та направленими свердловинами та їх комбінацією.

Вибір способу розкриття залежить від глибини залягання родовища, його потужності та кута падіння, розмірів відпрацьовуваного геотехнологічного поля, технологічної схеми розробки, рельєфу місцевості, властивостей корисних копалин і бокових порід, техніко-економічних показників, наявності джерел енерговодопостачання й утилізації відходів, відстані від постачальників до споживачів тощо.

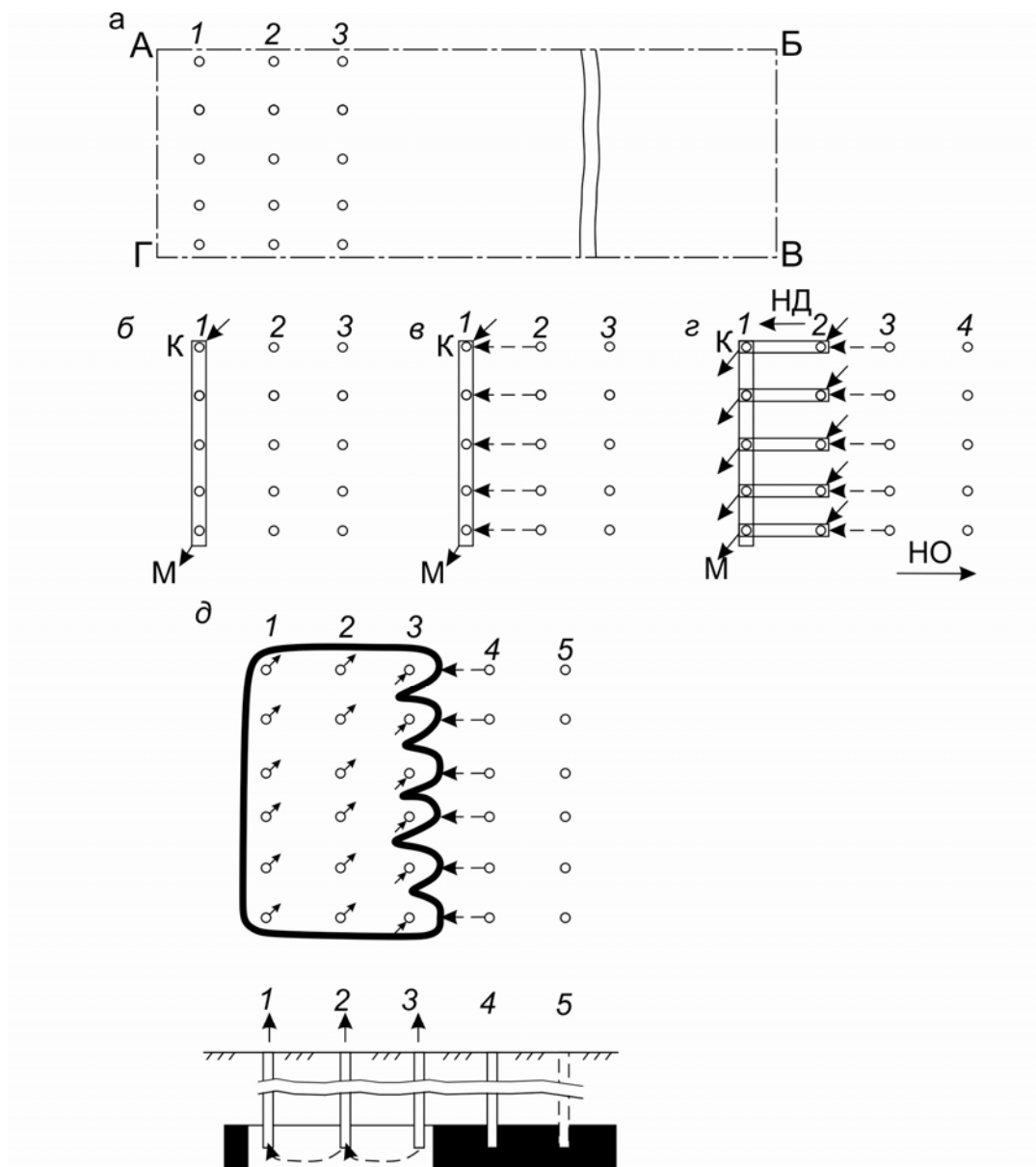
При підземній газифікації вугілля система розкриття вугільного пласта має на меті забезпечити підведення дуття в підземний газогенератор і виведення з нього газу, що утворився, а також створити сприятливі умови для проведення каналів газифікації з вибоїв свердловин, що розкривають вугільний пласт.

Найбільше поширення набула система розкриття вугільних пластів рядами вертикальних свердловин (рис. 3.1). Відстань між свердловинами 15 – 25 м.

Для організації процесу газифікації не вимагається попереднього розкриття свердловинами всієї площі пласта на ділянці підземного газогенератора. Достатньо пробурити тільки декілька рядів вертикальних свердловин (рис. 3.1, а) Буріння наступних свердловин розкриття проводиться у міру відпрацювання раніше пробурених. Кожна свердловина розкриття з'єднується з повітро- і газопроводом, а при повітряній збійці, ще і з повітропроводом, по якому подається повітря підвищеного тиску.

Перший ряд свердловин ставиться на збійку загальним збійним каналом КМ, який називається лінією розпаду підземного газогенератора (рис. 3.1, б). Потім проводять збійку свердловин другого ряду з лінією розпаду (рис. 3.1, в).

Вогневий вибій на цій лінії підтримується шляхом подачі дуття в збійний канал КМ і видведенням з нього газу через свердловини першого ряду. Після завершення збійки включається дуття, призначене для ведення процесу газифікації в каналах, які утворилися в результаті збійки між свердловинами обох рядів (рис. 3.1, г).



АБВГ - ділянка площі пласта; ♂ - нагнітальні свердловини;
♂ - газовідведні свердловини; ♂ - свердловини на частковому газовідведенні;
○← - свердловини, що знаходяться на збійці; 1,2,3,4,5 - ряди свердловини розкриття;
КМ - канал газифікації (збійка); НО - напрямок обробки;
НД - напрямок дуття.

Рис. 3.1. Схеми розкриття вугільних пластів рядами вертикальних свердловин і розвиток вогневих робіт

Відведення газу здійснюється через свердловини першого ряду.

Після вигазовування смуги вугільного пласта між 1 і 2 рядами свердловин, третій ряд ставиться на збійку з таким розрахунком, щоб ця збійка відбулася раніше, ніж буде вигазоване вугілля між 1 і 2 рядами. Відведення газу проводиться через свердловини 1 і 2 рядів (рис. 3.1, д).

У такій послідовності ведуться роботи на всій площі вугільного пласта, призначений для газифікації. Кожна свердловина використовується на трьох видах робіт: на збійці, прийманні дуття для газифікації та на відведенні газу.

Для газифікації похилих вугільних пластів набули поширення системи розкриття і вогневих робіт, при яких відпрацювання пласта починається від межі ділянки за падінням. На рис. 3.2 наведена схема розкриття вертикальними та похилими свердловинами. Схема дозволяє проводити пряму систему газифікації, коли вигазовування вугілля проводиться знизу до гори за підняттям пласта паралельно в каналах газифікації 10 – 16 і напрямком газифікації вугілля співпадає з напрямком руху дуття і газу.

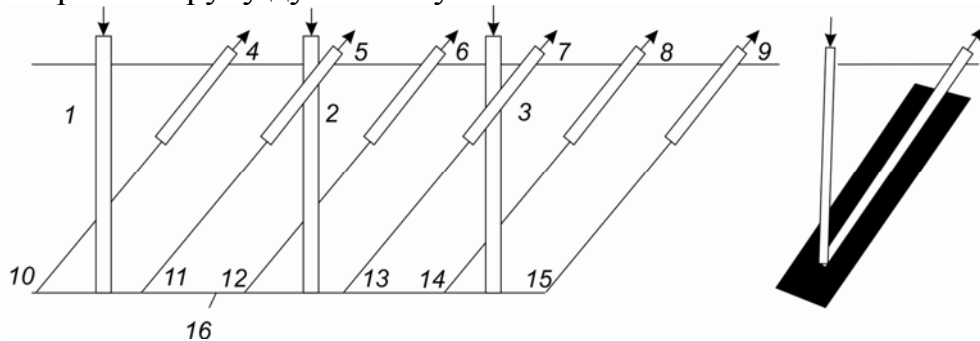


Рис. 3.2. Схеми розкриття вертикальними і похилими свердловинами:
1-9 - свердловини розкриття, 10-16 - канали газифікації

Відповідне підключення свердловин розкриття до трубопроводів дуття і газу дозволяє здійснити і реверсивну систему газифікації.

Діаметр дуттьових свердловин – 250 – 300 мм, газовідвідних – 350 – 400 мм.

Розкриття пологих пластів здійснюється направленими (похилими) свердловинами (рис. 3.3) [11, 12].

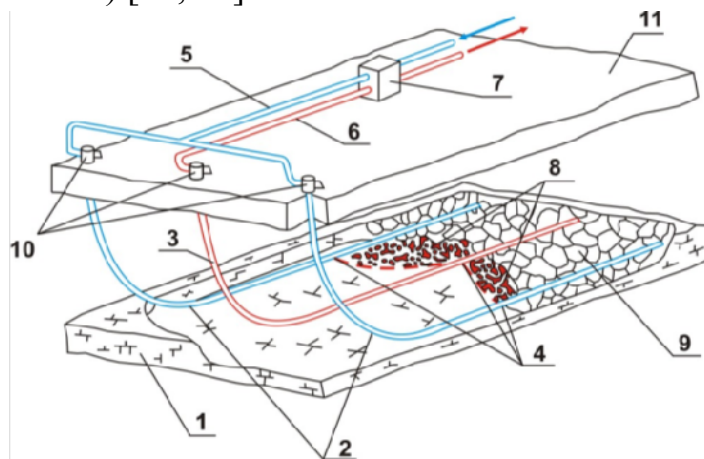


Рис. 3.3. Схеми розкриття вугільного пласта орієнтованими свердловинами:

1 – вугільний пласт; 2 – нагнітальні свердловини; 3 – газовідвідна свердловина; 4 – рухомі запальники; 5 – повітропровід; 6 – газовідвідна свердловина; 7 – теплообмінник-утилізатор; 8 – вогневий вибій (канал газифікації); 9 – вироблений простір; 10 – оголовки свердловин, 11 – земна поверхня

З поверхні до перетину з вугільним пластом 1 бурять направлені нагнітальні 2 і газовідвідні 3 свердловини. Запалювання пласта проводиться запальниками 4, а продукти горіння, що утворилися в каналі, видаються на поверхню. Теплова енергія відхідних газів газифікації утилізується в теплообміннику 7.

Поверхневі комунікації складаються з магістрального і панельних (дільничних) колекторів, кожний з яких має в собі газогін, повітропроводи низького, середнього і високого тисків. Повітропровід низького тиску використовують для подачі повітря в підземний газогенератор для одержання генераторного газу. Газогони середнього і високого тисків використовують для виконання робіт із з'єднання (збійки) свердловин у період розкриття панельних (дільничних) підземних газогенераторів (рис. 3.4).

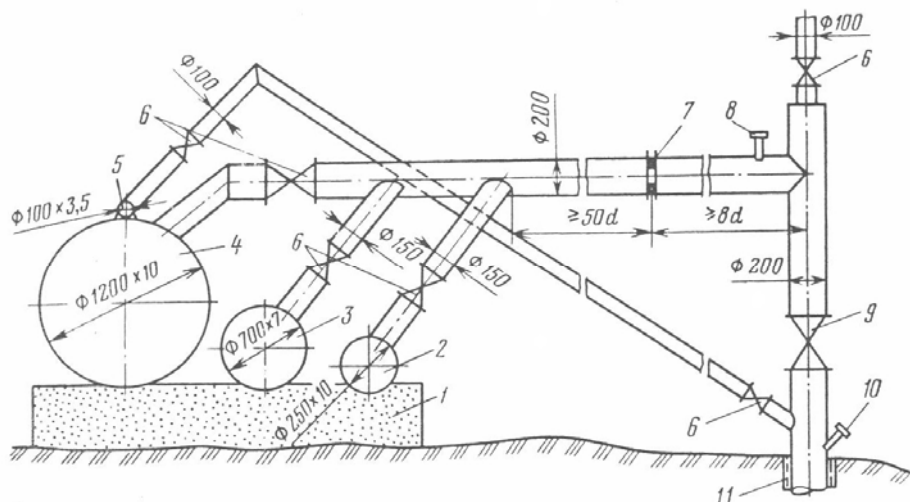


Рис. 3.4. Конструктивне оформлення газопроводів на поверхні землі:
1 – бетонна опора; 2, 3 – повітропроводи середнього та низького тисків;
4 – магістральний газопровід; 5 – повітропровід високого тиску;
6 – чавунні засувки; 7 – витратомірна діафрагма; 8, 10 – штуцери під
термометр; 9 – стальна засувка; 11 – затрубна цементация обсадної колони

У місцях врізу панельних колекторів у магістральний на всіх трубопроводах встановлюють засувки. Для зливання конденсату із газогонів і повітрогонів низького і середнього тисків у низьких точках траси колекторів вварюють патрубки з кранами.

Для компенсації температурних розширень газопроводів встановлюють на трубопроводах П-подібні компенсатори.

3.2. Властивості вугілля як сировини для підземної газифікації

У процесі СПГВ беруть участь горюча маса вугілля і вологість, яка міститься в ньому. Склад горючої маси та її вміст у вугіллі характеризують його теплотворну здатність (теплоту горіння). Теплота горіння може відноситись до 1 кг горючої маси чи 1 кг робочої маси. Розрізняють вищу Q_v і нижню Q_n теплотворну здатність вугілля. Вища теплота згоряння враховує тепло, яке виділяється під час конденсації водяних парів, які утворюються внаслідок спалення водню, що утримується у вугіллі у вигляді газу [13].

Нижня теплотворна здатність завжди менша від вищої на величину теплоти конденсації водяних парів продуктів спалювання. Оскільки на практиці тепло конденсації не використовують, то для визначення кількості теплоти, яка утворена при згорянні вугілля, використовують нижню теплотворну здатність.

Під час нагрівання без доступу повітря відбувається виділення з горючої маси (вуглецю) летючих речовин, газів і пари. Виділення летких речовин залежно від типу вугілля починається при $T = 403 - 673 \text{ K}$ ($130 - 400^\circ \text{ C}$) і завершується при температурі $1373 - 1475 \text{ K}$ ($1100 - 1200^\circ \text{ C}$). При цьому як твердий залишок утворюється кокс.

На процес СПГВ суттєво впливають такі його властивості як спікання, термічна стійкість, температура загоряння (спалаху), зашлакованість тощо.

Спікання – здатність подрібненого вугілля утворювати суцільну масу під час нагрівання без доступу повітря.

Термічна стійкість – стійкість проти подрібнення в процесі нагрівання вугілля.

Температура спалаху – відповідність температури, при якій хімічна реакція вуглецю вугілля з киснем починає проходити за рахунок власного тепловиділення. Для бурого вугілля ця температура дорівнює $453 - 473 \text{ K}$ ($180 - 200^\circ \text{ C}$), для деревного – 525 K (252° C), для кам'яного – $573 - 623 \text{ K}$ ($300 - 350^\circ \text{ C}$), для напівкоксу – 668 K (395° C), для коксу – 733 K (460° C).

Зашлакованість характеризує відношення маси шлаку до маси золи, що утворилася в процесі згоряння вугілля.

3.3. Розподіл температури по довжині каналу вогневого вибою

Відмінна технологічна особливість газифікації вугільних пластів – напрямок руху дуття і газових продуктів у каналі вогневого вибою і перпендикулярно до нього [11].

Основою процесу при підземній газифікації є взаємодія дуття і газів з твердою поверхнею стінок у каналі вугільного пласта. Реакції, що відбуваються при цьому, також є основними у порівнянні з іншими. В зв'язку з цим температурний режим пласта по довжині каналу газифікації визначається головним чином температурою повітряного дуття і газів.

По довжині каналу газифікації можна виділити вісім ділянок (рис. 3.5). Температура кожної з них характеризується процесом, який протікає на довжині каналу газифікації.

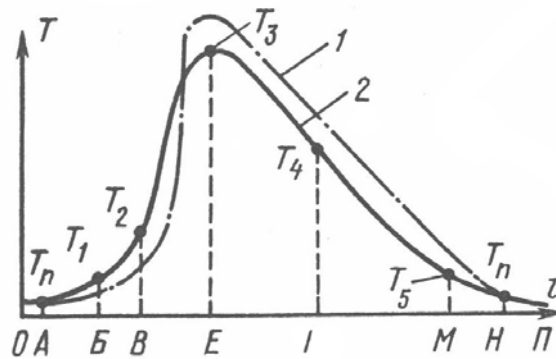


Рис. 3.5. Залежність зміни температури T від довжини каналу газифікації l : 1 і 2 – відповідно для газової фази і вугільної поверхні; ОА, АБ, БВ, ВЕ, ЕІ, ІМ, МН і НП – ділянки відповідно дуттьова, дуттьового осушення, підготовки до спалаху, екзотермічних реакцій, ендотермічних реакцій, термічного розкладання, газового осушення і продуктивного генераторного газу

На початковій ділянці дуття температура дуття и пласта практично не змінюється, бо при низьких температурах термічне розкладання вугілля та його регулювання з киснем дуття відбувається дуже повільно.

Ділянка дуттьового осушення характеризується підвищенням температури дуття від початкової природної температури пласта T_n до температури T_1 , при якій відбувається випарювання води з вугілля ($T_1 \approx 282 \text{ K}$ (110° C)).

На ділянці підготовки до спалаху вугілля відбувається його нагрівання від температури сушіння T_1 до температури спалаху T_2 ($T_2 \approx 473 \text{ K}$ (200° C) для бурого вугілля і $573 - 423 \text{ K}$ ($300 - 350^\circ \text{ C}$) – для кам'яного).

Зростання температури вугілля і дуття на ділянці ОВ пояснюється в основному теплопередачею за рахунок теплопровідності від більш прогрітих зон, розташованих праворуч.

Максимальне підвищення температури спостерігається на ділянці екзотермічних реакцій, де відбуваються основні процеси, тепловиділення яких значно перевищує тепловтрати у навколишнє середовище і на ендотермічні реакції.

Праворуч від цієї ділянки температура газової і твердої фаз знижуються. Температура T_3 приблизно дорівнює $1173 - 1273 \text{ K}$ ($900 - 1000^\circ \text{ C}$).

Ділянка ЕІ характеризується ендотермічними реакціями; раніше виділене тепло поглинається навколишнім середовищем і витрачається на ендотермічні реакції.

Пониження температури на наступній ділянці з T_4 ($T_4 \approx 853 - 900 \text{ K}$ ($580 - 630^\circ \text{ C}$)) до T_5 відбувається внаслідок тепловтрат у навколишнє середовище і на підтримання процесу термічного розкладання вугілля.

У межах ділянки газового осушення відбувається зниження температури з T_5 ($T_5 \approx 383 - 403 \text{ K}$ ($110 - 130^\circ \text{ C}$)) до температури пласта T_n через витрати тепла на осушення вугілля.

На ділянці правіше точки Н температура газообмінної та твердої фаз залишається практично постійною, яка дорівнює температурі пласта.

3.4. Техніко-економічні параметри каналу вогневого вибою

Основні технологічні параметри каналу газифікації – виробнича потужність, продуктивність, ефективність і гідравлічний опір.

Виробнича потужність каналу газифікації характеризується кількістю газу, який видається в одиницю часу, $\text{м}^3/\text{год}$, чи кількістю тепла, що виділяється внаслідок згоряння цього газу, $\text{Дж}/\text{кг}$:

$$Q = q \cdot D,$$

де q – вихід газу з одиниці дуття, $\text{м}^3/\text{м}^3$;

D – кількість дуття, що подається в канал газифікації, $\text{м}^3/\text{год}$.

Виробнича потужність каналу на станціях підземної газифікації, які працювали в 30-ті роки в Радянському Союзі досягає $1500 \text{ м}^3/\text{год}$ під час роботи на повітряному дутті.

Питома теплота згоряння (теплотворна здатність) одержаного газу залежить від кількості дуття.

Максимальна теплота згоряння газу дорівнює $(3,5 - 4) \cdot 10^3 \text{ кДж}/\text{м}^3$ при продуктивності повітряного дуття $4000 - 5000 \text{ м}^3/\text{год}$.

Продуктивність каналу газифікації (Π) характеризується кількістю вугілля, яке було спалене, кг , за весь час роботи каналу чи тепла, Дж , що виділилося під час згоряння одержаного газу.

Продуктивність каналу газифікації залежить від геологічних чинників і технології газифікації. До перших належать потужність пласта, вологість вугілля, властивості вміщуючих порід. До технологічних чинників – місце розташування каналу газифікації відносно рівня підшви пласта, режим дуття, система вигазовування пласта. Наприклад, при розташуванні каналу газифікації у підшві пласта зростає його продуктивність у декілька разів у порівнянні з розташуванням каналу у покрівлі.

Відношення продуктивності каналу газифікації Π_e до потужності вугільного пласта m , м , називають відносною продуктивністю, $\text{кг}/\text{м}$, чи $\text{Дж}/\text{м}$,

$$\Pi_e = \Pi/m.$$

Така характеристика дозволяє оцінити ефективність підземної газифікації пластів різної потужності.

Продуктивність, яка віднесена до довжини каналу l , називають питомою продуктивністю, $\text{Дж}/\text{м}$,

$$\Pi_n = \Pi/l, \Pi_n = N \cdot \gamma_z,$$

де N – кількість газу, одержаного за період роботи каналу газифікації, м^3 ;

γ_z – питома теплота згоряння газу, $\text{Дж}/\text{кг}$.

Питома ефективність роботи каналу газифікації характеризується площею вугільного пласта S , м^2 , яка була вигазована при відпрацюванні одиниці його довжини, l , м , $A = S/l$.

Цей чинник показує значення ширини вигазованого простору пласта даним каналом газифікації. Чим вища питома ефективність роботи каналу, тим при більшій відстані між ними можна відпрацьовувати вугільний пласт.

Питома ефективність роботи каналу газифікації залежить від геологічних чинників і властивостей вугілля. В середньому ширина вигазованого простору (або відстань між свердловинами розкриття) дорівнює 20 – 25 м.

Гідравлічний опір каналу вогневого вибою характеризує тиск дуття, який потрібен для ведення процесу газифікації. Ця величина зменшується в процесі газифікації вугілля і в середньому складає 50 – 70 Па.

Для оцінки економічної доцільності газифікації вугільних пластів використовують показник загального термічного ККД процесу k_m ,

$$k_m = (F_{\phi.z.} + F_{x.z.}) / (F_{\phi.v.} + F_{x.v.} + F_{\phi.d.}),$$

де $F_{\phi.z.}$ і $F_{x.z.}$ – відповідно фізичне і хімічне тепло продуктів газифікації;

$F_{\phi.v.}$ і $F_{x.v.}$ – відповідно фізичне і хімічне тепло витраченого вугілля;

$F_{\phi.d.}$ – фізичне тепло дуття.

Існує також хімічний ККД K_x , який дорівнює відношенню хімічного тепла продуктів газифікації до хімічного тепла згазифікованого вугілля

$$K_x = F_{x.z.} / F_{x.v.}$$

Його величина залежить від багатьох чинників і на практиці змінюється від 40 до 70 % .

3.5. Технологія одержання штучного генераторного газу

Газифікація вугільних пластів може здійснюватись одним або декількома підземними газогенераторами (каналами). Багатоканальна газифікація може здійснюватись паралельно чи послідовно [10]. При багатоканальній газифікації вогневі вибої переміщуються зворотним ходом від вибоїв похилих свердловин до їх устя. Вогневі вибої при цьому переміщуються набагато швидше в окислювальній зоні, де кількість дуття максимальна. У відновній зоні переміщення вибою відбувається з меншою швидкістю через мінімум повітряного дуття [1, 11].

При розкритті вугільного пласта вертикальними свердловинами вогневий вибій переміщується від свердловини до свердловини шляхом зміни кількості дуття в ту чи іншу свердловину. Вогневий вибій при цьому переміщується в той бік, де кількість дуття найбільша.

Вигазовування пласта в процесі газифікації вугільних пластів відбувається в дві стадії: перша – без обвалення покрівлі вигазованого простору; друга – з обваленням. На першій стадії ширина вигазованого простору порівняно невелика і покрівля, опираючись на пласт, знаходиться в стійкому стані. Зі зростанням ширини вигазованого простору покрівля прогинається й обвалюється, заповнюючи вигазований простір. Обвалення покрівлі відбувається не тільки під дією гірського тиску, але й під дією температури, коли породи розшаровуються, розтріскуються, випираються (здимаються) й оплавляються.

Вигазований простір заповнюється не тільки обваленими породами, але і шлаками, які утворюються внаслідок газифікації вугілля.

Суттєву роль в газифікації вугільних пластів грають підземні води. Витрачання тепла на випаровування підземних вод змінюється у широких межах. На добре дренажованих ділянках втрати тепла складають 7 – 10 %, а на непродражених до 35 – 42 % від тепла згоряння згазованого вугілля. Основне завдання дренажних робіт на ділянках підземної газифікації – підтримання рівня підземних вод таким, при якому б під час процесу газифікації приймала участь необхідна кількість води.

У період газифікації вугільних пластів необхідно вести контроль за ходом цього процесу для максимальної його продуктивності й ефективності. Контроль зводять до замірів кількості і тиску повітряного дуття; визначення складу і виміру кількості, тиску і температури одержаних газів; визначення вмісту і домішок у газових водах; виміру рівня підземних вод у вигазованому просторі; підземному газогенераторі та дренажних свердловинах. Окрім цього виконується контроль за герметичністю затрубного простору в свердловинах, зміною перерізу свердловин; станом земної поверхні, а також за справністю конструкцій наземної та підземної частин газогенератора.

Управління роботою підземного газогенератора зводиться до розподілення потоків дуття і газу в каналах газифікації та своєчасного введення в роботу нових каналів замість відпрацьованих.

Розподіл дуттьових і газових потоків необхідно робити таким чином, щоб забезпечити процес газифікації з можливо вищим хімічним ККД при мінімальних втратах дуття і в забезпеченні кількісних і якісних показників генераторного газу.

Критеріями для оцінки необхідності зміни кількості дуття є теплотворна здатність (теплота згоряння) і склад генераторного газу на виході з відповідної газовідвідної свердловини.

Параметри дуття вибирають такими, щоб питомі його витрати B_n , які необхідні для вироблення 1 м^3 газу, задовольняли відношенню:

$$B_n = \gamma \cdot D_z / D_o,$$

де γ – коефіцієнт, який характеризує втрати дуття під час газифікації,

$\gamma > 1$;

D_z і D_o – вміст азоту відповідно у генераторному газі та дутті.

Питомі втрати дуття залежать від багатьох чинників геологічного і технологічного характеру.

Ефективні способи управління процесом газифікації вугілля – запровадження сучасної когенераційної геотехнології виробництва, реверсивне спрямування руху дуття і генераторного газу, пульсаційний режим дуття з періодичною зупинкою його нагнітання, комбінація дуттьових потоків з подачею діоксиду вуглецю, пари, кисню, попереднє підігрівання повітряного потоку тощо [1].

Для забезпечення максимальної продуктивності й ефективності процесу газифікації вугільних пластів його потрібно здійснювати при паралельній роботі декількох підземних газогенераторів.

3.6. Функціональна структура підприємства підземної газифікації вугілля

Кожне виробництво генераторного газу містить у собі компресорний і повітродувний цехи, скрубєрне відділення (цех), магістральні колектори (газогони), підземні газогенератори, адміністративно-побутовий комбінат, склади матеріалів тощо [11].

У компресорному цеху знаходяться компресори для нагнітання стиснутого повітря, яке подається по трубопроводу магістрального колектора до підземних газогенераторів. Тиск повітряного дуття досягає $7 \cdot 10^6$ Па.

Сумарна необхідна продуктивність компресорів визначається параметрами генераторів.

Повітродувний цех оснащено повітродувками середнього (до $9 \cdot 10^5$ Па) і низького (до $3 \cdot 10^5$ Па) тиску.

Від компресорного і повітродувного відділень повітря подається по магістральному колектору до підземних газогенераторів. Колектор містить трубопровід високого тиску діаметром 100 мм, через який нагнітається повітря з тиском до $4 \cdot 10^6$ Па; трубопровід середнього тиску діаметром 250 – 350 мм, через який подається повітря під тиском до $6 \cdot 10^5$ Па; трубопровід низького тиску діаметром 700 – 900 мм, через який нагнітається повітря під тиском до $2 \cdot 10^5$ Па (див. рис. 3.1).

Компресорний і повітродувний цехи розташовують на промисловій площадці підприємства. Тут же розташовується скрубєрний цех для очищення продуктів газифікації від твердої та рідкої фракцій перед подачею генераторного газу споживачу. Схема скрубєрної установки підприємства наведена на рис. 3.6.

Скрубєрна установка містить у собі магістральний трубопровід діаметром 1200 мм для подачі генераторного газу від газогенераторів до скрубєра, розвідні патрубки з шиберами для подачі газу і води у скрубєри, відповідно, власне самі скрубєри, відвідні патрубки з шиберами для збирання очищеного генераторного газу у магістральний газотрубопровід. У кожному скрубєрі по його висоті установлені перегородки з численними отворами, в які впаяні короткі трубки. Схема однієї перегородки в скрубєрі наведена на рис. 3.7.

Витрата води, що подається в кожний скрубєр зверху, підбирається таким чином, щоб перевищення рівня води на кожній перегородці над верхнім зрізом трубок складало 2 – 3 мм. Генераторний газ, проходячи знизу до гори по трубках і через шар води над ними товщиною 2 – 3 мм, очищується від твердої та рідкої складових.

Після очищення газ по магістральному трубопроводу діаметром 2000 мм подається до споживача.

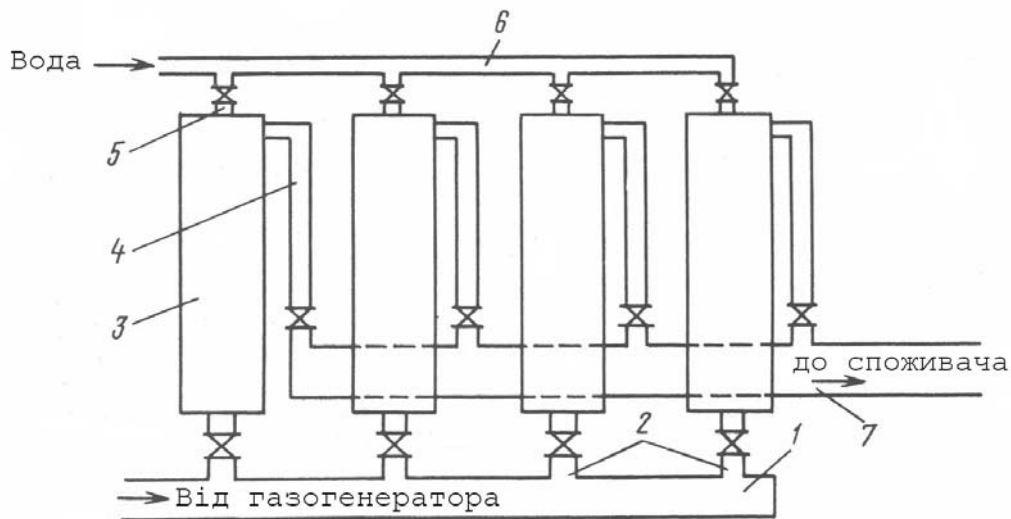
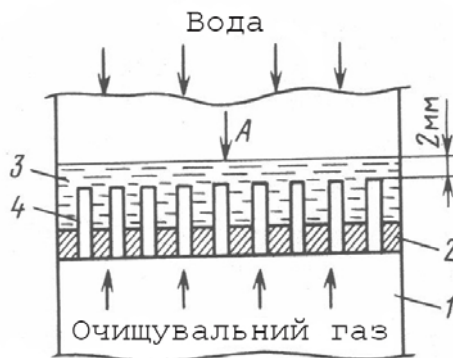


Рис. 3.6. Схема скруберної установки: 1 – магістральний трубопровід; 2 – розвідні патрубки для подачі газу; 3 – скрубер; 4 – відвідний патрубок з шиберами; 5 – розвідний патрубок для подачі води; 6 – водопровід; 7 – магістральний газопровід



Вид А

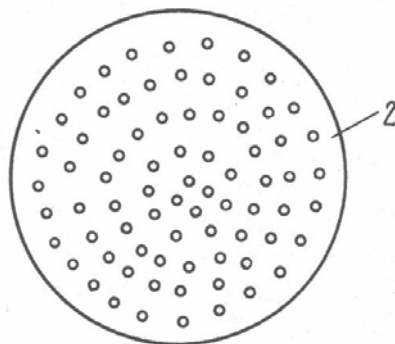


Рис 3.7. Схема перегородки скрубера: 1 – скрубер; 2 – перегородка з отворами; 3 – вода на перегородці; 4 – трубки, приварені до перегородки співвісно з отворами

Кожен підземний газогенератор це є ділянка вугільного пласта, яка розкривається системою вертикальних і похило-горизонтальних свердловин, які пробурені під нахилом 50 – 60° до рівня підшови пласта і далі по підшові пласта на довжину чи ширину підземного генератора.

Похило-горизонтальні свердловини призначені для подачі дуття і відведення генераторного газу, а вертикальні свердловини в комбінації з похилими використовуються як для газифікації, так і для приймання газу залежно від прийнятої системи відпрацювання. Площа газогенератора, що розкрита вертикальними свердловинами, в плані досягає 60 – 70 тис. м² і розмежена лініями поздовжніх і поперечних рядів за сіткою приблизно 15 × 15 м.

Газифікацію розпочинають з крайнього поздовжнього чи поперечного ряду (див. рис. 3.1) свердловин, який називають розпалювальним.

При підсіканні розпалювального ряду вертикальних свердловин однією похило-направленою свердловиною на всю довжину чи ширину газогенератора спрощується проходження каналу газифікації. За наявності тільки вертикальних розкривних свердловин у ряду розпалення спалах вогню розпочинають з трьох центральних свердловин цього ряду. Середню з трьох центральних свердловин ряду називають початковою свердловиною. Відстань між центральними свердловинами складає 7 – 10 м. Перед початком розпалення в початкову свердловиною подають під тиском $4 \cdot 10^5$ Па воду чи стиснене повітря для гідророзриву пласта між свердловинами з двох прилеглих центральних свердловин (може бути і з однієї) вода самозливається. Гідророзрив продовжують до того часу, поки тиск подачі води чи стисненого повітря не зменшиться до $(2 - 3) \cdot 10^5$ Па і не стабілізується на цьому рівні.

Після гідророзриву пласта між центральними свердловинами в початкову свердловиною нагнітають повітря середнього тиску $(5 - 10) \cdot 10^5$ Па для видалення води із пласта на ділянці між свердловинами початкової однієї з центральних прилеглих. Таке дуття подають до того часу, поки тиск не спаде до $2 \cdot 10^5$ Па і не стабілізується. Цей процес продовжується до 2 – 3 діб і називається повітряним просушенням.

Розпал пласта, на разі, виконують спеціальними розпалювальними патронами, або самим простим методом за допомогою розпеченого коксу, який засипають у початкову свердловиною. Порцію розпеченого вугілля на поверхні в кількості приблизно 10 кг насипають на шибер устя свердловини, і при його відкритті кокс просипається на дно свердловини. Щоб успішно виконати розпал, необхідно щоб розпечений кокс опинився на дні свердловини на рівні підосви вугільного пласта. З цією метою в початкову свердловиною на висоту перебуру (заглиблення свердловини трохи нижче підосви) засипають подрібнене вугілля. Після засипання розпеченого коксу на подрібнене вугілля забезпечують нагнітання у початкову свердловиною повітря середнього тиску.

Початок спалаху вугілля фіксують по специфічному запаху відхідних газів з однієї з прилеглих центральних свердловин. Поява газу в одній із центральних свердловин розпалювального ряду свідчить про те, що горіння пласта пішло від початкової свердловини у бік цієї центральній.

Після проходження каналу газифікації (методом фільтрації чи пропіка пласта, чи електрозбиванням) між двома центральними свердловинами розпочинають проходити канал газифікації між однією із цих свердловин і

прилеглою до неї суміжною у розпалювальному ряді. Це можна виконати завдяки тому, що кожна свердловина підключена до всіх трубопроводів колектора (трубопроводів високого, середнього і низького тисків; газопроводу).

У процесі збійки методом фільтрації в початкову свердловину нагнітають повітря під тиском до $4 \cdot 10^5$ Па і витратою до 500 м³/год. У період газифікації у свердловину подають повітря з тиском $(2 - 4) \cdot 10^5$ Па і витратою до 3500 м³/год.

Із газовідвідних свердловин у період газифікації виходить генераторний газ з залишковим тиском $(0,1 - 0,2) \cdot 10^5$ Па.

На усті дуттьових свердловин контролюють тиск, витрати і температуру повітряного дуття. На усті газовідвідних свердловин – тиск, температуру, хімічний склад і вологість газів.

4. Сучасна когенераційна геотехнологія вироблення генераторного газу з вугільного пласта

4.1. Комбіноване вироблення штучного газу

На цей час велику увагу у всьому світі приділяють процесам когенерації, тобто комбінованого (сумісного) вироблення теплової, механічної й електричної енергії при спалюванні палива (вугілля, мазуту, природного газу тощо), і створенню на їх базі систем акумулювання енергії.

За паливо пропонується застосовувати штучний генераторний газ, що утворюється під час підземної газифікації кам'яних і бурих вугільних пластів [11].

У Національному гірничому університеті розроблено принципово нові й економічно ефективні технологічні схеми газотурбінної комбінованої системи вироблення енергетичних ресурсів на єдиному енергоносії – газі, який одержують на основі свердловинної підземної газифікації вугілля (СПГВ), вільнопоршневих агрегатів (ВПАГів) і акумуляторів теплової енергії (рис. 4.1).

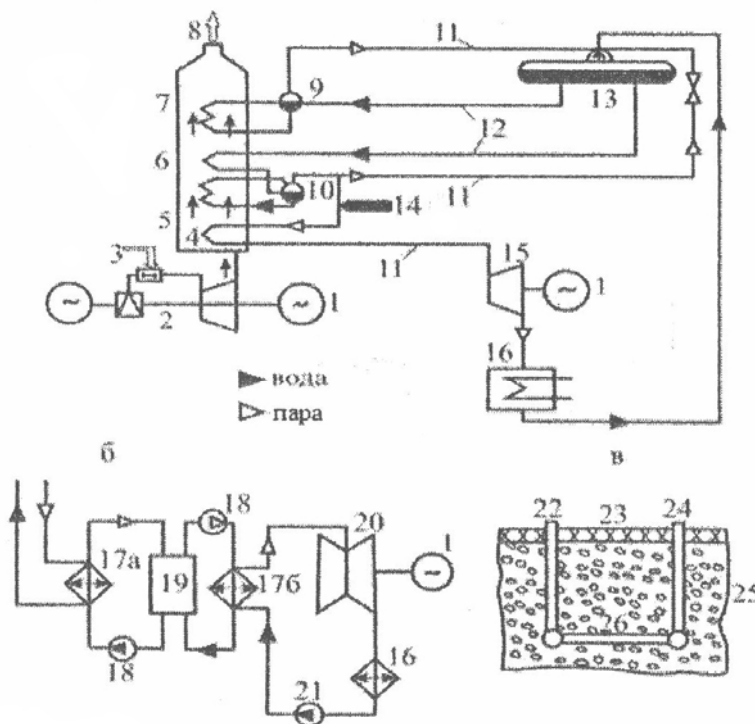


Рис. 4.1. Схема комбінованої газотурбінної енергетичної системи на базі СПГВ і систем акумулювання: а – газопаротурбінна установка; б – автоматичний піковий контур; в – підземний акумулятор теплової енергії: 1 – електродвигачі; 2 – група ВПАГів; 3 – газ СПГВ; 4 – котел-утилізатор; 5 – пароперегрівач; 6 – випарник; 7 – економайзер; 8 – вихід газів у теплові акумулятори; 9 – змієвик випарника низького тиску котла-утилізатора; 10 – секція високого тиску котла-утилізатора; 11 – теплоносій від змієвика 9 секції 10; 12 – теплоносій до змієвика секції 10; 13 – резервуар для води;

- 14 – пара з свердловинного парогазогенератора; 15 – паротурбінна група; 16 – конденсатор; 17, а, б – теплообмінники проміжного теплоносія; 18 – насос проміжного теплоносія; 19 – тепловий акумулятор; 20 – пікова двокаскадна турбіна; 21 – циркуляційний насос; 22 – вхід теплоносія (газів і пари із свердловинного парогазогенератора); 23 – теплоізоляція; 24 – вихід теплоносія; 25 – твердий акумулюючий матеріал; 26 – горизонтальні теплові канали

Когенераційне виробництво має три технологічні цикли отримання енергії, які, взаємно доповнюючи один одного, сприяють повному використанню енергоресурсів. Доповнює когенераційне виробництво також четвертий цикл – енергобіологічне виробництво, яке працює на теплі скидних вод основного процесу.

Вихідний газ (газ СПГВ) у комбінованій енергосистемі отримується геотехнологічним способом розробки вугільних родовищ з використанням методу свердловинної підземної газифікації вугільних пластів (рис. 4.2).

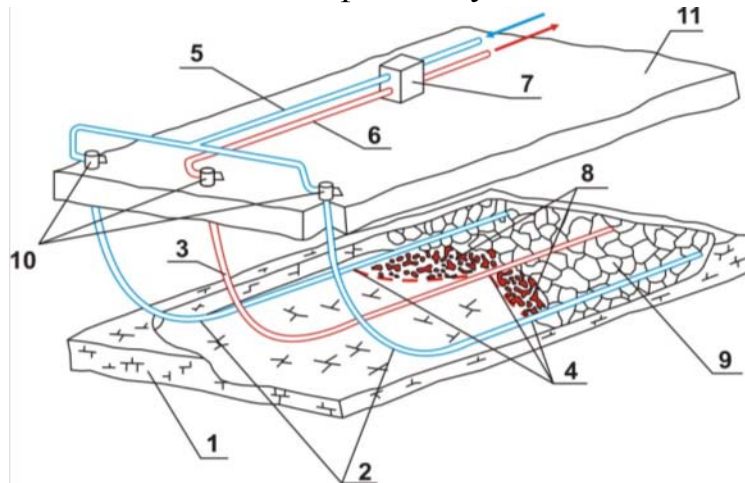


Рис. 4.2. Принципова схема свердловинної підземної газифікації вугільних пластів: 1 – вугільний пласт; 2 – нагнітальні свердловини; 3 – газовідвідні запалювальні пристрої; 4 – пересувні запалювальні пристрої; 5 – нагнітальний трубопровід; 6 – газопровід; 7 – теплообмінник-утилізатор; 8 – вогневий вибій; 9 – вироблений простір; 10 – оголовки вертикально-горизонтальних свердловин; 11 – поверхня землі

Основні параметри процесу свердловинної підземної газифікації вугілля (рис. 4.3) можуть бути визначені за наступною методикою.

Запаси вугілля в очисному блоці, т:

$$Z_{\text{бл}} = L \cdot H \cdot m \cdot \gamma,$$

де L – довжина горизонтальної частини криволінійної (орієнтованої) свердловини, м; (наприклад, $L = 450$ м);

H – ширина блока газифікації, м;

$$H = l \cdot n = 30 \cdot 6 = 180 \text{ м},$$

l – ширина стовпа (стрічки) газифікації, $l = 30$ м;

n – кількість стовпів (стрічок) у блоці;

m – потужність вугільного пласта, м (наприклад $m = 1,0$ м);
 γ – щільність вугілля, кг/м³ ($\gamma = 1200$ кг/м³);
 $Z_{\text{бл}} = 450 \cdot 180 \cdot 1,0 \cdot 1200 = 97200000 = 97,2$ тис. т.

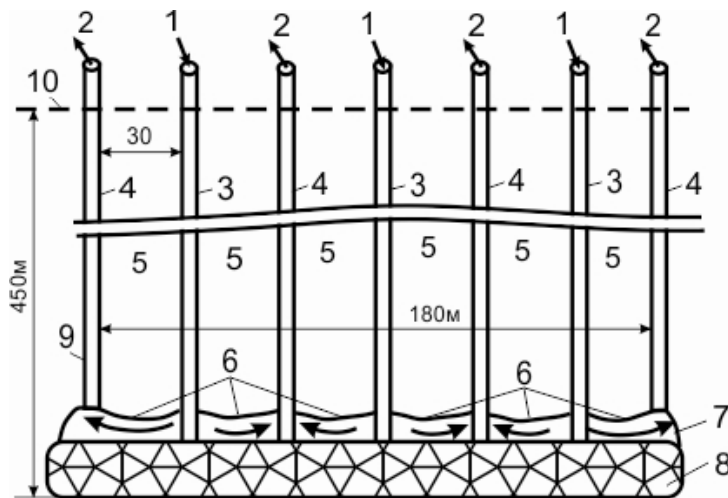


Рис. 4.3. Технологічна схема газифікації вугільного пласта виїмковими стовпами через вертикально-горизонтальні свердловини:

- 1 – дуттьовий потік (повітря, кисень, пара, діоксин вуглецю);
 2 – утворений генераторний газ; 3 – нагнітальна свердловина;
 4 – газовідвідна свердловина; 5 – смуги (підземні газогенератори);
 6 – вогневі вибої; 7 – зона газифікації; 8 – вигазований простір;
 9 – вугільний пласт; 10 – місця входження вертикальної частини свердловини у вугільний пласт

Швидкість горіння (посування вогневого вибою):

$$V_{\text{сер}} = V_z \cdot 24,$$

де V_z – лінійна швидкість газифікації вугільної стінки вогневого вибою м/град ($V_z = 0,01 - 0,1$);

$$V_{\text{сер}} = 0,01 \cdot 24 = 0,24 \text{ м/град.}$$

Час вигазовування одного стовпа:

$$t_{\text{см}} = \frac{L}{V_{\text{сер}}} = \frac{450}{0,24} = 1875 \text{ год} = 78 \text{ діб},$$

Термін відпрацювання всього блока:

$$T_{\text{б}} = t_{\text{см}} \cdot n = 78 \text{ діб.}$$

Кількість повітря, яке необхідне для газифікації відповідного об'єму вугілля за одиницю часу, м³/год:

$$Q_n = l_m \cdot v_z \cdot q_n \cdot \gamma,$$

де q_n – питомі витрати повітря, м³/год;

$$q_n = \alpha \cdot \frac{0,01 \cdot Q_n^p + 25,1 \cdot W^p}{4186},$$

де α – експериментальний коефіцієнт ($\alpha = 1,08 - 1,11$);

Q_n^p – нижня теплота горіння робочої маси вугілля, МДж/кг;

(Q_n^p залежить від якісних показників вугілля);

W^p – вологість робочої маси вугілля, % (для кам'яного вугілля $W^p = 12 - 18$ %, бурого – $W^p = 45 - 65$ %);

$$q_n = 1,1 \cdot \frac{0,01 \cdot 1 + 25,1 \cdot 18}{4186} = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$Q_n = 30 \cdot 1,0 \cdot 0,01 \cdot 0,1 \cdot 1200 = 36,0 \text{ м}^3/\text{год}.$$

Теоретичні витрати вугілля на одержання 1 м³ газу:

$$q_{\text{вуг}} = \frac{12 \cdot \sum C_z}{22,4 \cdot C_{\text{вуг}}},$$

де $\sum C_z$ – сума вуглецевмісних компонентів у газі в об'ємних процентах

$$\sum C_z = 12 \% (\text{CO}) + 3 \% (\text{CH}_4) + (14 - 18 \% \text{CO}_2)$$

де $C_{\text{вуг}}$ – вміст вуглецю у паливі (вугіллі), %, для кам'яного вугілля

$C_{\text{вуг}} = 65 - 85$ %, для бурого – $C_{\text{вуг}} = 45 - 55$ %;

$$q_{\text{вуг}} = \frac{12 \cdot (12\text{CO} + 3\text{CH}_4 + 16\text{CO}_2)}{22,4 \cdot C_{\text{вуг}}} = \frac{12 \cdot 31}{70 \cdot 22,4} = 0,24 \text{ кг/м}^3.$$

Вихід газу з 1 кг вугілля, м³/кг:

$$q_z = \frac{1}{q_{\text{вуг}}} = \frac{1}{0,24} = 4,2 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Вихід газу за 1 годину, м³/кг:

$$Q_z = q_n + l_m \cdot v_z \cdot q_n \cdot \gamma = 0,1 + 36 = 36,1 \text{ м}^3/\text{год}$$

або за добу, м³/добу:

$$Q_z^d = 24 \cdot Q_z = 24 \cdot 36,1 = 866 \text{ м}^3/\text{добу}.$$

Річна продуктивність підприємства з підземної газифікації вугілля, що має в експлуатації, наприклад, три блоки:

$$Q_z^p = 24 \cdot 365 \cdot 36,1 = 948270 \text{ м}^3/\text{рік} = 948,3 \text{ тис. м}^3/\text{рік}.$$

Група ВПАГів використовує газ СПГВ для генерації первинної електроенергії (чи теплоенергії). Вихідні гази із турбін проходять в котли-утилізатори з вироблення пари, яка призначена для пароводяної системи вироблення вторинної електроенергії. Залишкове тепло вихідних газів повторно утилізується у двох теплових акумуляторах: в автономному піковому контурі з вироблення третинної електроенергії та в підземному акумуляторі з утилізації тепла для потреб тепlopостачання.

Парогенератори, що вбудовані у свердловини СПГВ, утилізують тепло відхідних газів, а пара що утворюється у свердловинах, направляється у пароводяний цикл комбінованої електростанції і частково у підземний акумулятор. При цьому економиться біля 3 % палива у порівнянні з виробленням електроенергії на теплових електростанціях.

Вихлопні гази від ВПАГів надходять у котел-утилізатор (рис. 4.1), в якому нагрівається вода і пара до температури 300 – 400 К. Гарячі відпрацьовані гази від ВПАГів з котлом-утилізатором і паротурбінною групою використовуються для додаткового вироблення електроенергії. Така комбінація забезпечує отримання коефіцієнта корисної дії біля 50 % . У котлі відбувається відбір

частини теплової енергії, яка передається у пароводяний цикл перед тим, як гази будуть направляти у теплові акумулятори.

Котел-утилізатор має три теплообмінні секції (див. рис. 4.1, а). Вода під високим тиском подається через теплий кінець котла в економайзер, підігрівається майже до температури, необхідної населенню, і перетворюється потім у змійовику випарника у пару. Насичена пара нагрівається у подальшому в паронагрівнику і надходить у паротурбінну групу. Вона розширюється в лопаткових рядах, де тепла енергія перетворюється у механічну. Парові турбіни з'єднані з генераторами, що виробляють електричний струм.

Відпрацьована пара з парових турбін надходить у конденсатор і перетворюється у воду шляхом відведення скритої теплоти через систему охолодження. Конденсат направляється в деаератор підживлювальної води, де відбувається її очищення від газів CO_2 і O_2 за допомогою підігрівання паром котла-утилізатора. Деаератор сприймає також об'ємні коливання пароводяного циклу. Вода виходить з деаератора через підживлювальні насоси, які подають воду під тиском у котел-утилізатор.

Залишкове тепло відхідних газів повторно утилізується в акумуляторі автоматичного пікового контуру з вироблення електроенергії двокаскадною турбіною і у підземному акумуляторі (див. рис. 4.1, б, в).

Акумулятори (накопичувачі енергії) – це споруди чи пристрої, що забезпечують оборотні процеси накопичення, зберігання і вироблення теплової енергії відповідно до вимог споживача.

Система теплового акумулювання з проміжними теплоносіями (наприклад, технічним маслом) дозволяє збільшити потужність комбінованих електростанцій у піковому режимі на 60%.

Заряджання теплового акумулятора пікового контуру відбувається відпрацьованими газами ВПАГів. Нагріті гази з котла-утилізатора прямують у зарядний теплообмінник і нагрівають масло, що знаходиться в теплому акумуляторі 19. У процесі розряджання теплового акумулятора гаряче масло використовується для виробництва пари у теплообміннику пікового контуру. Електроенергія виробляється двокаскадною турбіною. Така система акумулювання теплової енергії дозволяє електростанції працювати у піковому режимі протягом 3 – 5 годин.

Тепловий акумулятор, який заряджається в період мінімальної потреби енергії і розряджається при максимальній (наприклад, ввечері), забезпечує роботу більшості обладнання електростанції у базовому режимі, що суттєво підвищує його надійність і ефективність.

Підземний акумулятор теплової енергії (ПАТЕ) також має автономний контур з твердою нерухомою акумулювальною матрицею. Як акумулювальну матрицю застосовують різні матеріали: шамот, магнетит, графіт, щебінь пісок і т.п.).

Такі ПАТЕ проектується з мінімальним гідравлічним опором, що дозволяє використовувати принцип вільноконвективного перенесення теплової енергії.

Під час заряджання гарячі газу, пара (вода) подаються в ПАТЕ, нагрівають акумулювальну матрицю і використовуються для накопичення тепла. Розрядження ПАТЕ сезонне (наприклад, зимою) для потреб теплопостачання.

Така система когенерації енергії знижує вартість відпускнуї електро- і теплоенергії за низкою факторів. До них відносяться: зниження капітальних витрат внаслідок відмови від будівництва спеціальних традиційних пікових енергоблоків, підвищення завантаження обладнання; вироблення електро- і теплової енергії з більш дешевого палива і з більшою ефективністю; відмова від традиційних видів палива (вугілля, природний газ, мазут тощо) завдяки маневровим піковим контурам.

Свердловинний процес підземної газифікації вугілля є ще одним джерелом енергії, бо не вся фізична теплота відхідних газів трансформується у свердловинних парогенераторах. Значний потенціал теплової енергії (300 – 600° С) може бути трансформований на поверхні у спеціальних сучасних теплоутилізаторах на теплових трубах. Вони дозволяють надійно (герметично) розділити зони обмінних середовищ, покращити експлуатаційні характеристики, оскільки очищення обмінних поверхонь не є важким, що важливо при перепусканні ще неочищеного газу СПГВ.

Після закінчення процесу газифікації вугілля в надрах землі у контурі вигазованого підземного простору утворюється потужний тепловий котел. В обвалених породах після газифікації створюється високий потенціал (800 – 900 °С). Для утилізації тепла в когенераційні й енергетичні системи на базі СПГВ у породи нагнітаються теплоносії через законсервовані (експлуатаційні) свердловини.

Холодний теплоносій (вода, повітря, інертний газ тощо) проникає через товщу обвалених гарячих порід, нагрівається (вода перетворюється в пару) й акумулюється у порожнині колишнього підземного газогенератора. Нагнітальні та відкачувальні свердловини можуть бути тимчасово загерметизовані, теплота тривалий час буде законсервована і використовуватиметься сезонно.

Таким чином, акумульована теплова енергія у відпрацьованому підземному газогенераторі передбачає високу інтенсивність використання витраченого тепла в надрах землі протягом тривалого періоду (до 10 – 12 сезонів) і низькі експлуатаційні витрати на регенерацію теплоти.

Під час роботи комбінованої енергосистеми значна частина теплової енергії відводиться з водою у навколишній простір у вигляді складного тепла з низьким температурним потенціалом (16 – 21° С зимою і 25 – 45° С влітку).

Для охолодження скидних теплових вод енергетичних об'єктів потужністю 0,5 – 1 млн кВт необхідний ставок-накопичувач з площею дзеркала води 400 – 700 Га; при цьому кількість води, що йде на випаровування, досягає 20 – 25 млн м³ на рік.

Тому значний економічний ефект може бути одержаний при використанні наших рекомендацій, які полягають у застосуванні тепла скидних вод комбінованої електростанції в енергобіологічному комплексі (ЕБК). До складу

ЕБК можуть входити такі структурні ланки: блок відкритого обігрівання ґрунту, рибогосподарський блок і біологічні меліорації водойм-охолоджувачів.

Блок відкритого обігрівання ґрунту має тепло-гідромеліоративну систему – підґрунтові градірні. Вона має багаторядні поліетиленові трубопроводи, які укладаються у ґрунт, і насосну станцію, що подає у систему теплу скидну воду. Тут створюються сприятливі умови для розвитку кореневої системи рослин і одночасно відбувається охолодження води на 10 – 13 С°. Обігрівання ґрунту дає можливість:

- отримати не менше двох урожаїв на рік сільськогосподарської екологічно чистої продукції;
- скоротити використання води на технічні потреби;
- покращити екологічні показники об'єкта й екологічний стан у регіоні;
- застосовувати скидні теплі води у традиційних тепличних комплексах вирощування овочів.

Із закордонного досвіду відомо, що на площах з підґрунтовими градірнями урожайність кукурудзи на зелену масу підвищується на 54 %, томатів – на 29 %, огірків – на 97 %, картоплі – на 46 %.

Рибогосподарський блок має повносистемний завод з садовим господарством.

Блок мікробіологічної переробки, утилізації відходів і біологічної меліорації призначений для відходів рибогосподарства і рослинництва.

Блок біологічної меліорації водойми-охолоджувача може використовуватися для промислового розведення риби.

В ЕБК відходи одного блока є сировиною для другого, внаслідок чого багатогалузеве виробництво стає маловідходним (в ідеалі безвідходним), яке працює на єдиній ресурсозберігаючій екологічно чистій технології. До енергобіологічного комплексу можуть бути включені такі виробництва як зимові та плівкові теплиці.

Таким чином, когенераційна система виробництва енергоносіїв на блоках СПГВ, систем акумулювання й енергобіологічної переробки має наступні переваги. Застосування єдиного джерела палива підвищує ефективність генерування енергоресурсів, забезпечує безперервність, низьку операційність виконуваних процесів, матеріало-, енерго- та ресурсозбереження, покращує екологічну ситуацію в регіоні.

Як проміжні теплоносії застосовують високотемпературні накопичувачі енергії, які мають відносно низьку температуру плавлення і високу точку кипіння (приблизно до декількох сотень градусів). До них відносяться мінеральні масла, кремнійорганічні з'єднання, розплавлені метали і солі. Такі теплоносії дозволяють працювати при атмосферному тиску.

У комбінованій енергосистемі використовуються вторинні енергоресурси: хімічна енергія генераторного газу; фізична його теплота у свердловинних парогенераторах і термосифонних теплообмінниках; відпрацьована і вторинна пара; гаряча вода у накопичувальних акумуляторах; тепло від охолоджувальних

пристроїв в енергобіологічному комплексі. Когенераційна енергосистема дозволяє знизити витрати вугілля за рахунок його повного вигорання в процесі СПГВ і знизити кількість викидів у навколишнє середовище оксидів (CO_2), сірки (SO_2 і SO_3), азоту (N_2), а також золи, шлаків, сажі у порівнянні з традиційним паливно-енергетичним комплексом. Значно зменшаться ушкодження навколишнього середовища, а також території під відвалами шахт, розрізів, збагачувальних фабрик, теплових електростанцій та транспортні перевезення.

Впровадження котлів-утилізаторів і теплообмінників на теплових трубах (двофазних термосифонах) як поверхонь нагрівання є одним із перспективних напрямів удосконалення енергосистем. Це обумовлено високою ефективністю теплообміну в них, можливістю глибокої утилізації відхідних газів, невеликими масою і габаритами, спрощеними конструкціями і технологією виготовлення, зручністю експлуатації.

Доведено, якщо газогенераторне підприємство з вироблення енергії вугілля із ВПАГами доукомплектувати котлами-утилізаторами, паровими турбінами з електрогенераторами й акумуляторами енергії, то тільки на одному свердловинному газогенераторі може бути додатково одержано

28,2 МВт електричної енергії. При цьому термін окупності капіталовкладень складає 2 – 3 роки. Це забезпечить найкраще використання енергії вугілля в процесі одержання генераторного газу методом СПГВ.

Економічні показники запропонованих когенераційних технологій оцінюються загально-відомими схемами розподілу палива, що витрачається на отримання електроенергії та тепла.

Графіки зміни витрат палива на вироблення 1 кВт·год електроенергії залежать від економічності застосування газотурбінного двигуна і теплового навантаження котла (рис. 4.4.).

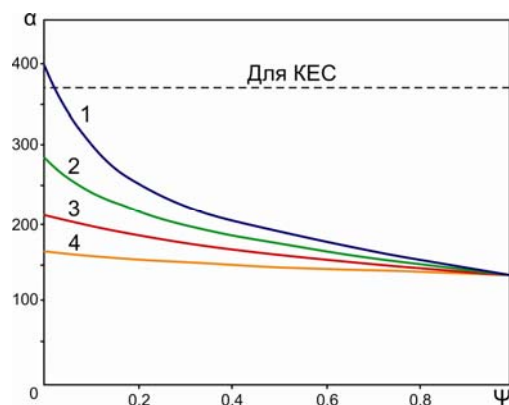


Рис. 4.4. Питомі витрати палива на вироблення електроенергії у когенераційній установці залежно від теплового навантаження котла:

1 – $\alpha_m = 10$; 2 – 8; 3 – 6; 4 – 4

Мінімальні питомі витрати палива при виробленні електроенергії мають місце при максимальному тепловому навантаженні котла і дорівнюють питомим витратам палива на вироблення тепла, а максимальні – у режимі

утилізації. Як бачимо, цей показник у когенераційній установці набагато нижчий, ніж для конденсаційної теплової електростанції (пунктирна лінія) і тим суттєвіший, коли більш економічний газотурбінний двигун застосовується для надбудови котла.

Детальний аналіз енергетичних характеристик когенераційних схем, виконаних на базі водонагрівальних котлів і газотурбінних двигунів, показав, що частка виробленої в установці енергії $P = \frac{P_{el}}{P_{el} + P_m}$ повністю визначається термодинамікою енергетичного двигуна, що однозначно характеризується коефіцієнтом надлишку повітря в його відпрацьованих газах α_m і коефіцієнтом теплового навантаження котла $\psi = \frac{Q_k}{Q_k^o}$ – як відношення витраченого у котлі палива до витрат Q_k^o максимального теплового навантаження котла, яке одержуємо при спалюванні у вихлопних газах турбіни при $\alpha_m = 1$ (рис. 4.5).

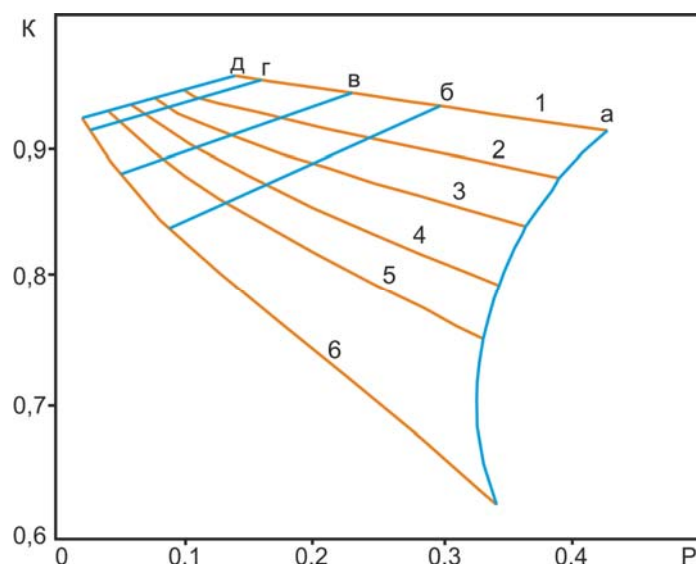


Рис. 4.5. Енергетичні характеристики когенераційної установки:
 1 – $\alpha_m = 3$; 2 – 4; 3 – 5; 4 – 6; 5 – 7; 6 – 10; а – $\psi = 0$; б – 0,2; в – 0,4; г – 1,0;
 д – для ψ_{max}

Для оцінки прибутку, який приносить когенераційна установка, термінів окупності капіталовкладень у модернізацію опалювальної котельної, а також впливу на ці показники основних енергетичних характеристик обладнання приймаються наступні умови: вартість енергетичного обладнання 480 \$ США на встановлений кВт електричної потужності, ціна електроенергії – 4,1 цента/кВт·год, ціна природного газу – 83 \$ США за 1000 м^3 , коефіцієнт амортизації – 0,1, час роботи обладнання складає у середньому 7000 год/рік. Витрати на будівельні роботи, зарплату і податок на прибуток не враховувались. Залежність терміну окупності установки від теплового навантаження котла й економічності газового двигуна наведена на рис. 4.6, а.

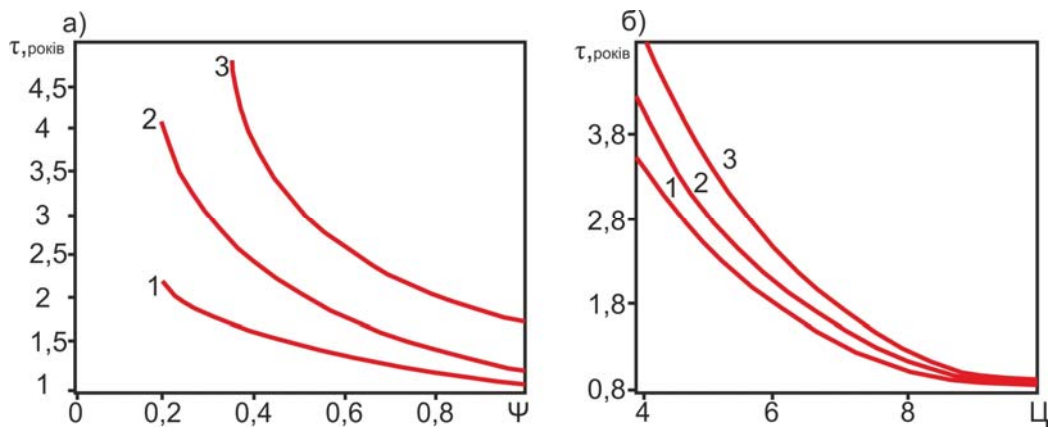


Рис. 4.6. Залежність терміну окупності когенераційної установки:
а – від теплового навантаження котла: 1 – $\alpha_m = 3$; 2 – 5; 3 – 7;
б – ціни електроенергії на ринку при тепловому навантаженні котла
 $\psi = 0,5$ і цінах на паливо: 1 – $\Psi_g = 83$ \$ США/1000 м³; 2 – 100;
3 – 120

Як бачимо, термін окупності витрат різко знижується під час теплових навантажень і зростанні економічності газового двигуна. При застосуванні сучасного газового двигуна з $\alpha_m = 5$ для кліматичних умов України з відносною тривалістю опалювального сезону біля 0,5 термін окупності на побудову когенераційної установки на базі опалювального водопідігрівального котла складе 3,3 роки, і це без урахування усіх витрат. Вплив відпускнуї ціни електроенергії на термін окупності когенераційної установки наочно ілюструється графіком (рис. 4.6, б).

Навіть при збільшенні ціни на паливо до 120 \$ США за 1000 нм³ газу при ціні електроенергії 6 – 7 центів/кВт·год термін окупності капіталовкладень на побудову когенераційної установки на базі газотурбінного двигуна знижується до 2-х років і нижче.

Далі розглянемо технологічні схеми вироблення біогазу і видобутку метану на шахтах.

Промислові та комунальні котельні можна перевести на когенераційні установки, які, окрім основного технологічного процесу, можуть виробляти біогаз. Спосіб одержання біогазу дуже поширений у країнах з теплим кліматом протягом цілого року (Індія, Китай, Бразилія тощо). Анаеробне зброджування (ферментація) у біоустановках (метантенках) відбувається при температурах 30 – 45° С. В Україні, в умовах континентального клімату, особливо восени, зимою, весною, робота метантенків практично неможлива. Однак цілорічна робота метантенків можлива при утилізації димових вихідних парів енергетичних установок у теплообмінних на теплових трубах. Нагрітий у теплообміннику теплоносіє (вода, пара, повітря, інертний газ тощо) застосовується для обігріву установок одержання біогазу. Під дією анаеробного зброджування в резервуарі утворюється біогаз (90 % метану).

Таким чином, використання біогазових установок на шахтних котельних дозволяє вирішити три, важливіших з енергетичного сільськогосподарського й

екологічного боку, завдання: отримати біогаз, перевести сільськогосподарські відходи (що є сировиною для одержання біогазу) в доходи; уберегти навколишнє середовище від різних збудників захворювань людини і тварин, оскільки такі збудники гинуть у процесі переробки біомаси.

У вугільних родовищах накопичено величезні запаси метану, які перевищують світові ресурси природного газу і дозволяють розглянути вугільні басейни як газовугільні родовища. Комплексне освоєння цих родовищ вирішує проблему двох енергоносіїв – метану і вугілля.

Цінна якість метану з вугільних родовищ – відсутність з'єднань сірки, що значно спрощує і здешевлює технологію підготовки його до використання. Видобутий способами дегазації метан утилізується понад 60 років. За кордоном частка використання метану складає 80 – 90 %. В Україні вона не перевищує 5 %, при цьому газ застосовують тільки як паливо у шахтних котельнях і для заправки автомобілів, що є далеко не самим ефективним способом утилізації.

Одержаний газ, залежно від вмісту у ньому метану і кількості самого газу, можна застосовувати як паливо у парових котлах, у коксових, доменних, цементних і скляних печах, як добавки у міську газопостачальну мережу, також у двигунах внутрішнього згоряння, газових турбінах і вільнопоршневих агрегатах.

Можна відзначити деякі особливості використання когенераційних технологій. Перша з них полягає у тому, що електро- і тепла енергія виробляються практично на місці споживання. Це ліквідує величезні втрати (що досягають у деяких випадках 13 – 18 %) у лініях електропередач. Розрахунки показують, що у більшості випадків перетворення теплогенеруючих потужностей (котелень, ТЕС) в когенераційні дозволяє практично повністю забезпечити житлові масиви у вугільних регіонах або на 30 – 40 % – потреби вугільних підприємств, що прив'язані до розглянутого теплогенератора. За виключенням крупних виробництв це дозволяє вирішувати місцеві або регіональні енергетичні проблеми, забезпечивши власну енергетичну незалежність.

Друга особливість полягає у тому, що спалювання палива в когенераційному циклі призведе до суттєвого зменшення викидів парникових газів у традиційних енерготехнологіях, зменшення кислотних дощів, і покращить екологічний стан. Таким чином, когенераційні технології з способів вирішення регіональних енергетичних проблем переростають в елемент енергозбереження у вугільній галузі та загальнодержавну енергетичну програму. З такими потужностями, які можуть бути введені за допомогою трансформації теплоелектрогенеруючих потужностей у когенераційні, необхідно рахуватись, бо вони можуть, за скромними оцінками, досягти 14 – 19% від встановлених електрогенеруючих потужностей держави. При цьому може бути зекономлено біля 10 – 12 млн т у.п. на рік. Для цього у держави є реальні можливості, оскільки вже в 2005 році практично всі теплові електростанції та значна частина котелень відпрацювали не тільки розрахунковий, але і граничний ресурс роботи, а до 2020 року повинні бути виведені з експлуатації й усі атомні електростанції. Тому проблема модернізації

нашої енергетики може і повинна вирішуватись з урахуванням програм розвитку когенераційних технологій у вугільній промисловості і державі, а уточнена стратегія розвитку енергетики, яку потрібно створити з урахуванням реального стану нашого паливно-енергетичного комплексу, повинна реально врахувати місце когенерації в енергетиці України.

Вихід із енергетичної кризи (за відсутності коштів і Енергетичної програми, яка б передбачувала розвиток когенераційних технологій) є, на наш погляд, у широкомасштабній реалізації інноваційних проектів із залученням вітчизняних і закордонних інвесторів для створення сучасних енергоефективних енергозберігаючих екологічнобезпечних технологій і обладнання, які вимагають для своєї реалізації порівняно невеликі капіталовкладення при терміні будівництва, що не перевищує 1 – 1,5 роки. запропоновані когенераційні технології, як це виходить із вищенаведеного, повністю задовольняють цим умовам.

5. Основні схеми формування області повних зрушень і проявів тиску товщі гірських порід при веденні процесів газифікації

5.1. Формування зон зрушень гірських порід

Виходячи з досвіду роботи шахтної підземної розробки вугільних родовищ і багаторічних лабораторних і стендових експериментів технологічних схем газифікації вугільних пластів процес формування області повних зрушень і тиску на ґрунт пласта змінюється у часі та просторі. Виявлення закономірностей цього процесу має першорядне значення з погляду вибору часу проведення бурових робіт і місця розташування свердловин з розкриття родовища направленими свердловинами для проведення газифікації вугільних пластів. Практично це означає, що для закладання бурової направленої свердловини потрібно мати у своєму розпорядженні два параметри, тобто відстань від кромки масиву (вогневого вибою) за падінням або підняттям до вертикальної частини свердловини. Нижче з вищезгаданих позицій викладаються результати власних досліджень технологічних схем і проводиться аналіз досліджень, що є в літературі, щодо вивчення проявів зрушень і проявів опорного тиску у міру розвитку вогневих робіт при газифікації.

За даними цих схем (рис. 5.1), вся область, охоплена впливом вогневих робіт, поділяється на характерні зони, кожній з яких властиві певні види деформації товщі порід. Принципової відмінності в схемах зрушення немає, тому з деяким допущенням їх можна розглядати як єдину робочу схему, що приймається за початкову для вирішення низки питань, пов'язаних з охороною вертикальної (похилої) свердловини.

Розглянемо основні закономірності зрушення товщі порід у кожній зоні та перерозподіл тиску в гірському масиві (рис. 5.1).

Зона I обвалення або інтенсивного дроблення порід покрівлі пласта знаходиться безпосередньо над вогневою виробкою (вогневим вибоєм). Незв'язне зрушення в ній окремих гарячих кусків (блоків) породи періодично повторюється у міру випалювання вогневого вибою. При достатньо великих розмірах площі відслонень крівлі висота зони зі нормами до нашарування складає звичайно 4 – 10 потужностей пласта. Величина цієї зони залежить від виймальної потужності пласта, структурної будови, фізико-механічних властивостей покрівлі та ґрунту і від величини температури процесу газифікації вугілля в підземному газогенераторі.

Зона II повних зрушень або шарнірно-блокового переміщення гірських порід розташовується над зоною I, якщо ж остання відсутня, то безпосередньо над вигазованим простором. У шаруватій товщі зона II має форму склепіння, витягнутого у бік більшого розміру площі вогневого вибою. У міру посування вогневої виробки і з часом шари порід (наприклад, глинистих) у цій зоні розтріскуються від температури й осідають, втрачаючи зв'язок з рештою масиву; спільно з породами зони I вони поступово ущільнюються й утворюють ядро склепіння зрушення.

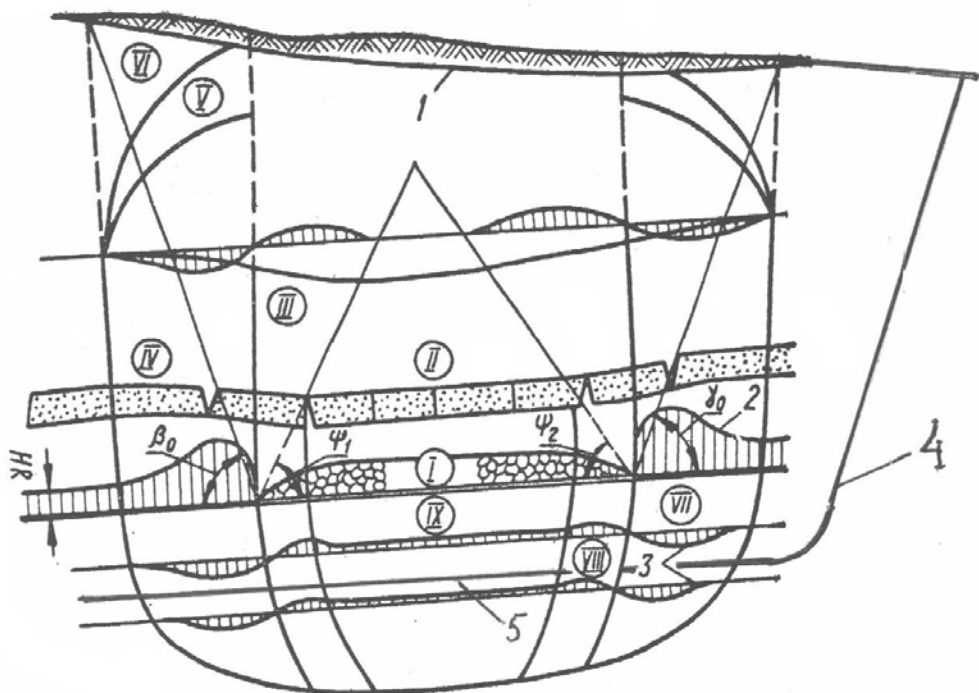


Рис.5.1. Схема зрушення товщі порід на розрізі вхрест простягання при газифікації вугілля одним генератором: I – зона обвалення порід кривлі пласта; II – зона повних зрушень порід із порушенням суцільності шарів у вигляді тріщин; III – зона найбільшого плавного прогину без порушення суцільності шарів порід; IV – зона опорного тиску в покрівлі пласта (стиснення порід за нормами до нашарування); V – зона малих знакозмінних деформацій; VI – зона зрушення порід практично без деформацій за нормами до нашарування; VII – зона опорного тиску в покрівлі верхнього і в ґрунті нижнього пласта (стиснення порід); VIII – зона нерівномірного підняття порід (розвантаження); γH – гірський тиск у незайманій частині гірського масиву; β_0 , γ_0 – граничні кути (за падінням і підняттям) зрушення земної поверхні; ψ – кут максимального осідання порід; 1 – крива осідання земної поверхні; 2 – епюри нормальних напруг в зоні опорного тиску; 3 – графіки деформацій порід за нормами до нашарування; 4 – похила (породна) частина направленої свердловини; 5 – горизонтальна (пластова) частина направленої свердловини

Шари порід у межах зони II після закінчення процесу газифікації займають положення, паралельне первинному. В результаті склепінчастого осідання порід гірський тиск на ґрунт пласта біля меж вигазованого простору менше ніж у середній частині зони. Величина тиску залежить головним чином від ваги порід, укладених усередині ядра скліпіння зрушень. Розміри останнього визначаються площею вогневої виробки, глибиною розробки, структурною будовою і фізико-механічними властивостями підробленої товщі порід. Ущільнення гарячих порід (деформації стиснення) усередині зони зростає до настання умов повної підробки земної поверхні. Напрямок векторів зрушення близько співпадає з нормаллю до площини нашарування.

У конкретних умовах розробки висоту ущільнюючого ядра склепіння можна визначити, знаючи кути обвалення (розломів) товщі порід за падінням ψ_1 , підняттям ψ_2 і простяганням f_3 , а також крок посадки основної покрівлі. При пологому заляганні пластів кути обвалень не залежать від кута падіння пластів, мають приблизно постійне значення $65 - 80^\circ$ й орієнтовані по відношенню до площин нашарування порід. Висота h області зрушень, що містить зони I, II, III, визначається меншим розміром площі вогневого вибою і кутами між твірною областю та площиною нашарування порід за падінням λ_1 , підняттям λ_2 і простяганням λ_3 за формулою [14]:

$$h = \frac{L_1 \cdot tq \lambda_1 \cdot tq \lambda_2}{tq \lambda_1 + tq \lambda_2}, \quad (5.1)$$

де L_1 – довжина вигазованого простору за підняттям, м.

Оскільки межі зони III встановлено приблизно, при визначенні за формулою (5.1) висоти області повних зрушень практично можна користуватися значеннями кутів обвалень товщі порід ψ_1 , ψ_2 і ψ_3 .

Зона IV плавного прогину без порушень суцільності шарів порід охоплює товщу, прилеглу до зони III і вище, і характеризується плавним послідовним прогинанням окремих шарів. Усередині зони є розшарування. У порожнини цих розшарувань можна закачувати глинистий або цементний розчини для герметизації підземного газогенератора. Розвантаження порід за нормами тут не має яскраво вираженого максимуму і приурочене до середини. Зона IV має якнайменші розміри в площині нашарування на рівні вершини склепіння повних зрушень. У міру наближення до земної поверхні розміри зони поступово збільшуються, що пояснюється неоднаковими умовами вигину шарів у гірському масиві. При невеликій глибині газифікації зона IV може бути повністю відсутньою, а на великих глибинах, обмежених розмірах площі вогневої виробки, матиме значні розміри.

У зоні V опорного тиску в покрівлі пласта відбувається плавний (сумісний) прогин шарів без помітного розриву суцільності та без переміщень між ними. Прогинаються шари в основному внаслідок стиснення гірських порід, вугільних пластів і прошарків за нормаллю до нашарування. Опорний тиск у товщі гірських порід біля меж вогневих робіт при газифікації створюється внаслідок їх зависання над вигазованим простором і передача частини ваги завислих порід як додаткового навантаження на масив.

Якщо породи міцній існує великий контактний зв'язок між шарами, то зони опорного тиску простежуються на значних відстанях від меж вогневої виробки, не виявляючи яскраво вираженого максимуму.

Зі збільшенням розмірів вогневого простору опорний тиск і зона його розповсюдження в площині пласта зростає до тих пір, поки область повних зрушень не досягне земної поверхні. Для глибин газифікації в межах 200 – 1000 м довжину зони опорного тиску можна визначити за формулою

$$l = 250 \cdot \sqrt{m \cdot H} \cdot \left(\frac{1/q + 1}{q^2 + 90} \right) \cdot h,$$

де l – довжина зони проявів опорного тиску, м;

$m = 0,5 - 2,8$ м – потужність пласта;
 $q = \lambda/\lambda_0 = \lambda/\lambda_{10}$; λ – межа міцності порід на стиснення;
 h – коефіцієнт, $h = 0,6 - 0,8$.

У зоні VI, прилеглої до земної поверхні, характер процесу зрушення суттєво відрізняється від характеру зрушень у зоні IV. За відповідних умов тут можуть утворитися тріщини розривів, що виходять на земну поверхню поблизу межі мульди зрушень. Залежно від глибини газифікації та розмірів площі підземного газогенератора зона VI може накладатися на I – IV зони, внаслідок чого і характер процесу зрушення і тиску в зоні VI змінюватиметься.

Зона VII розвантаження або підняття порід ґрунту пласта розташована безпосередньо під підземним газогенератором і має форму перевернутого склепіння. Після вигазовування вугілля в ній відбувається розвантаження порід від первинного гірського тиску. З часом, у міру осідання підроблених порід, гірський тиск тут поступово зростає і досягне постійної величини. По контуру зони VII величини підняття ґрунту набагато менше, ніж в її середній частині і, як правило, менше величини зсувів у зворотному напрямку [15].

Зони VIII і IX незначного розвантаження характеризуються невеликими підняттями ділянок товщі порід, прилеглих до земної поверхні; розташовані вони за зонами опорного тиску [16]. Параметри цих зон на даному етапі поки що не вивчено і не встановлено.

На цей час найбільше практичне значення з погляду вибору параметрів і місця розташування вертикально-горизонтальної свердловини мають наступні зони: зона I обвалення або інтенсивного дроблення порід, зона II повних зрушень або шарнірно-блокового переміщення порід, зона III і IV найбільших вигинів шарів і можливим утворенням пластів між шарами порід і розкритих тріщин, а також зона V опорного тисків.

Як відомо, розкриття пологих пластів проводиться направленими свердловинами, які складаються з двох частин: похилої (іноді вертикальної) та пологої (горизонтальної).

Вертикальні частини направленої свердловини рекомендується розташовувати так, щоб після проходження вогневого вибою вона знаходилася в зоні, де відсутній шкідливий вплив підробки вогневым вибоєм. Зони шкідливого впливу вогневих робіт підроблюваного пласта на вертикальну частину свердловини містить у собі шкідливу частину зони найбільших вигинів верхніх шарів породи. Межі зон шкідливого і нешкідливого впливу на розрізі вхрест простягання при сталому процесі зрушення шарів гірських порід (рис. 5.2) дані на основі стендових випробувань зрушень порід у період газифікації і натурних спостережень при підземній розробці вугільних пластів шахтним способом.

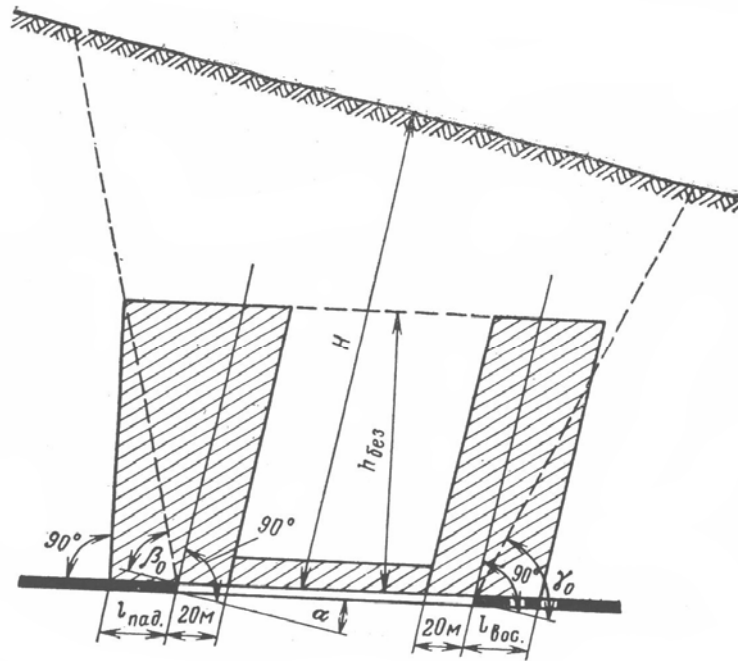


Рис. 5.2. Зони шкідливого впливу одного газогенератора на масив порід вхрест простягання

На рис. 5.2 показано рекомендовані параметри зон шкідливого впливу підроблюваного пласта за підняттям, падінням і простяганням

$$l_{\text{під}} = k \cdot H_{\text{г}} \cdot \text{ctg} \gamma_0, \text{ м},$$

$$l_{\text{над}} = k \cdot \frac{H_{\text{над}} \cdot \cos(\beta_0 + \alpha) \cdot \cos \alpha}{\sin \beta_0}, \text{ м},$$

$$l_{\text{пр}} = k \cdot H \cdot \text{ctg} \delta_0, \text{ м},$$

де $H_{\text{під}}$, $H_{\text{над}}$ – глибина від поверхні до кромки пласта (вогневого вибою) відповідно за підняттям і падінням;

γ_0 , β_0 , δ_0 – граничні кути;

α_0 – кут падіння пласта;

δ_0 – коефіцієнт, що враховує співвідношення між розміром загальної зони опорного тиску і зоною шкідливого впливу. На підставі натурних наглядів шахтної розробки пластів рекомендується приймати для нестійких вміщуючих порід $k = 0,6 - 0,7$; для порід середньої стійкості $k = 0,4 - 0,5$, для міцних порід $k = 0$ [17]. Розмір безпечної висоти підробки, в цілику вугільного пласта при вході направленої свердловини у вугільний пласт, визначається залежно від глибини вогневих робіт і потужності підроблюваного пласта з виразу:

$$h_{\text{без}} = \frac{(250 + H) \cdot m}{5}, \text{ м},$$

де m – потужність пласта, м, що підробляється;

H – глибина робіт від поверхні, м ($100 \geq H \geq 550$ м).

Розмір безпечної зони підробки визначають з метою зниження ефекту руйнування (роздавлення (гірським тиском направленої свердловини в перехідній (викривленій) її частині. Тут передбачається перехід від трубного

утримання (обсадної) частини вертикальної або похилої частини свердловини – до безтрубної горизонтальної. Безтрубне утримання свердловини створюється штучним спорудженням глинистої кірки по всьому діаметру і довжині горизонтальної частини свердловини.

Кути повних зрушень (рис. 5.3) приймаються $\psi_1 = 45^\circ$ і $\psi = 45 + 0,3\alpha$, а значення безпечної висоти підробки над кромкою вогневого вибою пласта $h_{кр}$ – за даними табл. 5.1.

Таблиця 5.1

Глибина розташування горизонтальної частини свердловини, м	Безпечна висота підробки горизонтальної свердловини при міцності порід на стиск $h_{кр}$, Н/см ²						
	100	200	300	400	500	600	700
100	60	50	45	40	35	30	20
200	100	75	65	55	50	40	35
300	140	100	80	75	65	50	40
400	180	125	100	90	80	65	50
500	220	270	120	105	95	75	60

Висота шкідливого впливу опорного тиску в зоні повної підробки $h_{н.п.}$ приймається в 2 рази меншою ніж над кромкою.

Безпечна висота розташування горизонтальної свердловини приймається також рівною $h_{н.п.}$ (див. рис. 5.3).

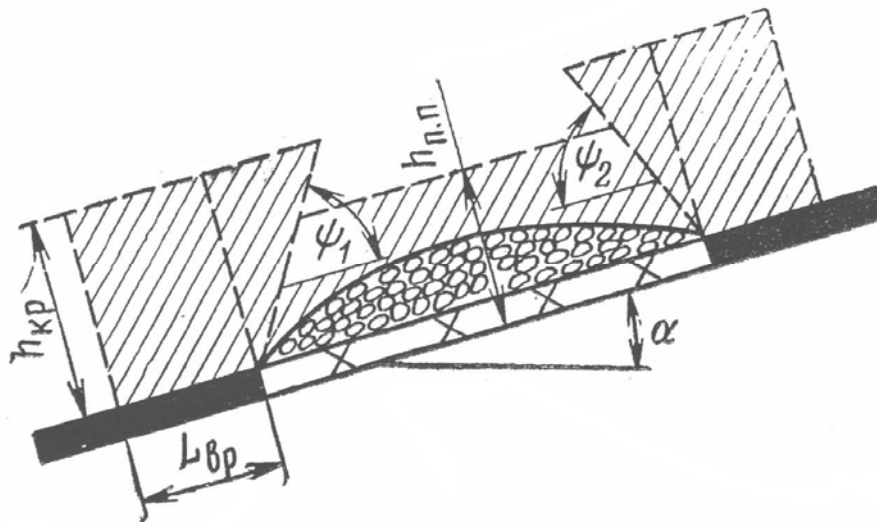


Рис. 5.3. Схема утворення кутів зрушень на розрізі вхрест простягання пласта

Розкриття вугільного пласта здійснюється свердловинами, пробуреними з поверхні, і є одним з основних видів робіт при газифікації вугільних пластів. Витрати на бурові роботи для розкриття пласта досягають 60 – 80% від загальних витрат на будівництво й експлуатацію станції підземної газифікації.

При розкритті пластів похило-направленими свердловинами породну частину свердловини бурять по пустих породах і укріплюють її обсадними трубами з цементуванням затрубного простору, а горизонтальну (пластову)

частину не укріплюють металевими трубами. Стійкість стінки такої свердловини досягається за рахунок :

- поглинання (глинистого) бурового розчину пластом по тріщинах, порах і кавернах;
- проникнення фільтрату бурового розчину в поровий простір;
- проникнення твердих частинок бурового розчину в поровий простір.

Проникнення твердих частинок супроводжується утворенням глинистої кірки на стінці свердловини і внутрішньої глинізації, внаслідок чого стійкість стінки горизонтальної частини свердловини різко підвищується.

Поглинання бурового розчину вугільним пластом забезпечується гідродинамічним тиском на вибої за умови:

$$P_{cm} + P_z \geq P_n,$$

де P_{cm} – гідростатичний тиск стовпа бурового розчину;

P_z – допустимий гідростатичний тиск, виходячи з якого обчислюють допустиму подачу бурових насосів щоб уникнути гідророзрив пласта;

P_n – тиск поглинання, визначуваний як тиск гідророзриву пласта або розкриття природних тріщин. Технологія похило-направлених свердловин основана на використанні геологічних умов, сприяючих викривленню свердловин, і на використанні спеціального відхильника із вибійним електродвигуном, встановлюваним між електробуром і бурильною колоною, секції якої з'єднані один з одним під кутом $1,5 - 2^\circ$.

У викривленій частині свердловини бурильна колона, як правило, притиснута до стінки свердловини. Сила притиснення N на кожній окремо взятій ділянці складається з двох складових: сили, викликаной натягом бурильної колони, і нормальної складової ваги труб [18]:

$$N = Q \cdot \Delta\sigma + q \cdot \Delta l \cdot \sin\alpha, \quad (5.2)$$

де Q – натяг бурильної колони в даному інтервалі, Н;

$\Delta\sigma$ – кут обхвату для даної ділянки, рад;

q – вага 1 м труб, Н;

Δl – довжина ділянки, м;

α – зенітний кут;

Кут обхвату $\Delta\sigma$ – це центральний кут, розміщений між радіусами кривизни, проведеними до меж ділянки, що розглядається, і який визначається наступним виразом:

$$\Delta\sigma = \Delta\alpha = \alpha_k - \alpha_n; \Delta\psi = \psi_k - \psi_n; \alpha_{сер} = \alpha_k - \alpha_n/2,$$

де $\alpha_k, \psi_k, \alpha_n, \psi_n$ – відповідно зенітний і азимутний кути в кінці та початку інтервалу, рад.

У зв'язку з тим, що зовнішній діаметр бурильної колони постійний, контакт бурильних труб із стінками свердловин здійснюється в основному через поверхню бурильних замків. Тому велике значення має визначення притискної сили на один замок N_z . З формули (5.2) маємо:

$$N_z = \frac{Q \cdot \Delta\sigma \cdot l_z}{\Delta l} + q \cdot l_m \cdot \sin\alpha_{сер},$$

де l_3 – відстань між замками (з дослідних даних, притискна сила на один замок на ділянці набору кута знаходиться в межах 14,2 до 37 кН).

5.2. Напружений стан у товщі гірських порід

Інтенсивність проявів гірського тиску в період газифікації вугілля залежить від напруженого стану масиву порід у місці ведення вогневих робіт. Для визначення напруженого стану порід і вугільних пластів у зонах впливу вогневого вибою необхідно знати всі компоненти тензора напружень, які досить важко безпосередньо виміряти у твердому середовищі і тим більше у недоступній для замірів товщі гірських порід. Тому кількісно оцінити компоненти напружень у підроблених і надроблених товщах порід можна в основному розрахунковим шляхом. У зв'язку з цим для обґрунтування розрахункової схеми з визначення напруженого стану масиву порід у зонах впливу вогневих вибоїв при вигазовуванні світ пластів розглянемо основні закономірності деформації порід і вугільних пластів у надроблених і підроблених товщах на схемі, зображеній на рис. 5.1.

Під час вигазовування вугільного пласта у підроблених і надроблених товщах утворюються три характерні зони напруженого стану порід: опорного тиску, розвантаження й ущільнення порід (зони IV, VII, VIII), – які переміщуються у просторі разом з вогневим вибоєм, який рухається. В зоні розвантаження розширення вугільних пластів за нормаллю досягає 3 – 4 % потужності пласта, а підняття порід надробленого масиву – 200 – 250 мм. При цьому підняття надробленого масиву відбувається в основному внаслідок пружного відновлення пород. Такі величини розширення пластів і підняття надробленої товщі свідчить про значну пружність масиву гірських порід.

Найбільш складні механічні процеси відбуваються у підроблених товщі порід у процесі обвалення гірських порід. У цих умовах з точки зору зрушення породи утворюються зони їх обвалень; розломів і розшарувань; вигинів без розриву суцільності шарів гірських порід.

Зону обвалень порід можна визначити за формулою :

$$h_{об} = (m - \varphi) / (\Delta - 1),$$

де m – потужність пласта;

φ – величина опускань основної покрівлі (до її обвалення);

Δ – коефіцієнт розрихлення обвалених пород, для $\Delta = 1,20 - 1,35$ висота пород з урахуванням температурного фактора і конвективного теплообміну в товщі порід дорівнює 6 – 8 потужностям пласта.

Висоту h_T зони тріщинуватості порід у період газифікації можна визначити в частках потужності пласта за формулою:

$$h_{T/m} = 32m - 15,1m^2 + 3,5m^3 + 1.$$

Для випадків вигазовування тонких і середньої потужності вугільних пластів значення $h_{T/4m}$ коливається у межах $h_{T/4m} = 21 - 45$.

При керуванні покрівлею у вогневих вибоях повним обваленням у підробленій товщі порід за межами зони розломів і розшарувань відбувається повне розвантаження породи від гірського тиску.

Як відомо, неоднорідність масиву порід згідно з теорією пружності анізотропного тіла змінює відношень модулів пружності в напрямку паралельно напластуванню і за нормаллю до напластування для більшості гірських порід не впливає суттєво на напружений стан порід навколо вогневих вибоїв.

У процесі вигазовування світ пластів межі області впливу вогневих вибоїв суттєво зростають, що неминує призводить до зростання геометричних розмірів площі підроблених пластів при вигазовуванні пластів одночасно декількома газогенераторами. Тому розробка світ обумовлена необхідністю врахування взаємного впливу вогневих вибоїв і неоднорідності складу порід між пластами за необхідності визначення напружено-деформованого стану масиву порід навколо вогневих виробок, які знаходяться під впливом вогневих робіт на сусідніх пластах.

У процесі розрахунку напруженого стану товщі порід необхідно поставити задачу, яка пов'язана відповідними гірничо-геологічними умовами, а саме: визначити для умов плоскої деформації компоненти напружень навколо вогневих вибоїв і залежності від глибини вигазовування, кута падіння пластів, потужності та неоднорідності складу порід між пластами, взаємного розташування, тиску підробленого масиву на підшву, температурного чинника, потужності прогрівання порід і коефіцієнта бічного розпирання у непорушеному масиві.

5.3. Деформації гірських порід при високій термічній температурі

У 30-х роках минулого сторіччя на декількох радянських підземних станціях «Підземгаз» були проведені гірничі роботи з розкриття вигазованого простору. Гірничі виробки були проведені з довколишніх діючих шахт. Були проведені дослідження і візуальні нагляди за станом гірських порід, що остигнули від високої температури. Було встановлено, що зона обвалення порід покрівлі у вигазованому просторі залежить від структури вміщуючих порід, взаєморозташування цих порід, а також закономірностей і характеру деформації верхньої товщі порід на ділянці, що газифікується.

При нестійких породах зона обвалення відстає від лінії вогневого вибою на 0,1 – 0,5 м. При стійкій же покрівлі площа завислого відслонення досягає на окремих ділянках великої величини і обвалюється на відстані 1,5 – 3 м. Окрім гірського тиску (вага верхньої товщі порід), на обвалюємості порід кривлі позначається також висока температура технологічного процесу газифікації вугільних пластів. Під дією розжарених газів, які проникають в тріщини, породи кривлі прогриваються, збільшуються в об'ємі і руйнуються.

Лінія вогневого вибою і контур обвалення порід покрівлі мають складну східчасту конфігурацію. Це пов'язано з тим, що інтенсивність газифікації в зоні дуттьових свердловин більше, ніж у газовідвідних, що і зумовлює відповідний розвиток процесу обвалення порід покрівлі. В обох випадках воно веде до

різкої зміни поперечного перерізу аеродинамічного каналу газифікації по довжині вогневого вибою і негативно позначається на ефективності технологічного процесу газифікації. В зоні безладного обвалення порід покрівлі утворюються додаткові канали (їх часто називають “паразитними каналами”), по яких рушити обвідні дуттьогазові потоки, не вступаючи в контакт з реакційною поверхнею вугільного пласта. Розширення аеродинамічного каналу газифікації за рахунок обвідних потоків знижує інтенсивність процесу ПГЗ і веде до збільшення втрат вугілля через неповноту його вигорання і вигазовування.

У період газифікації вугільних пластів відбувається розрив суцільності порід над вигазованим простором. В цих умовах на невеликих глибинах може відбутися розгерметизація підземного газогенератора за рахунок утворення тріщин до самої поверхні, просідань, воронки і провалів поверхні землі, а також зміна гідрогеологічного режиму. Частково, можливі з'єднання надвугільних водоносних горизонтів з вигазованим простором підземного газогенератора, виток дуття, газу і пари в тріщинуватий масив гірських порід і розповсюдження газу на значні відстані за рахунок дренірованія по тріщинах.

Встановлено, що в процесі газифікації вугільних пластів бокові породи підземного газогенератора піддається термічному зміцненню за рахунок інтенсивної та тривалої дії на них високих температур (900 – 1300°C) при надмірному тиску в газогенераторі. В результаті поверхневий шар порід частково або повністю змінює свої фізико-механічні властивості, перетворюючись на штучний камінь.

Передача тепла породам відбувається шляхом теплопровідності, конвекції та випромінювання. Найбільш інтенсивно нагріваються породи при конвективному теплообміні, тобто коли рушійна маса є розжареними газами. Гази проходять по порах і тріщинах порід, нагрівають їх, викликаючи, крім того, хімічні реакції.

Надмірний тиск у підземному газогенераторі сприяє термозміцненню масиву порід за рахунок посилення фільтрації розжарених газів. Під дією цього тиску і зростання температури вільна волога переміщується вглиб масиву порід і при температурі 100° С або дещо більшій починається випаровування. Пара, що утворилася, переміщується по тріщинуватих породах, віджимаючи підземну воду від контуру газогенератора. В інтервалі температур 100 – 130° С починає віддалятися хімічно зв'язана вода, а при нагріві до 200° С випаровується майже вся вільна і зв'язана вода. При температурі 200° С вигоряють органічні включення.

В інтервалі температур 200 – 400° С починає дегідратація каолінітів, віддаляється міцно зв'язана і хімічно зв'язана вода, знижується здатність порід до того, що просяде і пученню. При температурі 400 – 600° С продовжується дегідратація каолінітів, в процес це якої розрушається їх кристалічні ґрати і дещо знижується прозорість масиву на стиснення. Проте подальше підвищення температури швидко відновлює втрачену міцність масиву і потім вона продовжує рости.

В інтервалі температур 600 – 900° С відбувається дисоціація карбонатів ($CaCO_3$, $CaSO_4$). За наявності вільного вапна CaO відбуваються реакції вапна з кремнеземом і полуторними оксидами.

Силікати, алюмінати й алюмоферрити, що утворюються, підвищують міцність до 4 – 5 МПа.

При подальшому підвищенні температури до 1200° С відбуваються процеси декарбонізації й утворення силікатів, алюмінітів і алюмоферритів і починається спікання і плавлення приповерхневих шарів голих бокових порід. Стінки оплавляються на товщину 8 – 15 см. Перетворення кремнезему і його модифікацій супроводжуються збільшенням їх об'єму на 12 – 15% внаслідок чого пори і тріщини порід заповнюються расплавом, забезпечуючим їм високу густину. Оплавлений шар перешкоджає подальшій передачі тепла в глиб масиву порід шляхом конвекції. Міцність расплаву, що остигнув, досягає 20 – 40 МПа.

6. Фізико-технічні властивості та термодинамічні процеси в гірських породах

6.1. Будова і склад мінералів і гірських порід

За хімічним складом мінерали поділяються на шість основних груп: самородні елементи, сульфіді, оксиди, силікати, солі киснеродних кислот, галогеніди.

Тип і назва гірських порід визначаються їх мінеральним складом (відносним вмістом у породі мінералів) і будовою (подобою складання гірських порід з мінералів і мінеральних агрегатів).

Практично різна порода складена з мінерального і порового об'ємів. Поровий об'єм оцінюється відносним об'ємом усіх пор (пустот), які містяться у породах між мінеральними частинками чи їх агрегатами. Відносний об'єм називається загальною пористістю N (%) і виражається формулою:

$$N = [V_n / (V_0 + V_n)] \cdot 100, \quad (6.1)$$

де V_n – об'єм пор, м^3 ;

V_0 – об'єм мінерального скелета, м^3 .

Відношення об'єму пор до об'єму мінерального скелета породи:

$$\psi = V_n / V_0 \quad (6.2)$$

називається коефіцієнтом пористості.

Із формул (6.1) і (6.2) одержуємо:

$$N = [\psi / (1 + \psi)] \cdot 100.$$

Пори між іншим можуть з'єднуватись із зовнішнім середовищем і між собою, утворюючи суцільні звивисті канали. Загальний об'єм таких пор, які віднесені до об'єму усієї породи, називають відкритою (ефективною) пористістю N_{ef} . При цьому $N_{ef} < N$.

Пористість гірських порід змінюється в значних межах: бувають породи практично непористі та такі, в яких пористість досягає 90 %. У середньому ж пористість гірських порід складає 1,5 – 30 %.

Високою пористістю володіють осадові породи. Середня пористість сланців дорівнює 8 %, пісковиків – 15 %, вапняків – 5 – 10%.

Мінеральний об'єм породи описують наступними параметрами: розміром і формою зерен; неоднорідністю зерен за розмірами і формою; відносним вмістом складових зерен кожного розміру і кожної форми; взаємною орієнтацією зерен; ступенем зв'язку між зернами породи.

Шаруватість гірських порід оцінюють чисельно за допомогою коефіцієнта відносної шаруватості, що дорівнює кількості прошарків (чи площин ослаблення), які припадають на одиницю розміру зразка, що є перпендикулярним шаруватості.

Мінеральний склад, пористість і будова гірських порід визначаються їх генезисом і впливом різних зовнішніх факторів (рухом земної кори, діяльністю вітру і води, тиском, температурними коливаннями) протягом усього періоду їх існування.

Залежно від характеру зв'язків між зернами визначають наступні основні типи порід:

- крихкі – (роздільно-зернові) – зв'язки між зернами молекулярні та часто практично відсутні, породи бувають з механічних сумішей частинок одного чи декількох мінералів (піски, гравій, галька);
- тверді (скельові) – зв'язок між частинками мінералів жорсткий, хімічний (пісковики, граніти, діабазы, гнейси);
- зв'язані – зв'язок між дисперсними частинками породи сильно змінюється залежно від вологості – від молекулярних у щільних у сухому стані до іоно-електростатичних – у зволоженому (глинисті породи, лесові, суглинки).

Серед осадових порід за своїми параметрами складу і будови особливо виділяють групу порід органічного походження, це суміші з'єднань вуглецю з воднем, азотом, сіркою, киснем. Ці породи є важливими джерелами енергії.

Вміст вуглецю у сухій беззольній масі вугілля залежить від ступеня їх метаморфізму. Так, найменше метаморфізоване вугілля вміщує 76 – 79 % вуглецю, антрацити – 93 – 95 %.

Невуглецеві складові вугілля присутні у ньому у вигляді мінеральних включень і елементів – домішок. Включеннями у вугіллі можуть бути різноманітні мінерали – кварц, глина, пірит, кальцит і ін. Відносний масовий вміст цих мінеральних компонентів, які переходять під час горіння вугілля в золу, називають зольністю вугілля.

Якість вугілля знижується за наявності в них сірки. Загальний вміст сірки у вугіллі коливається від часток проценту до 5 – 6 %.

Елементи домішки у вугіллі складені з германію, галію, урану, міді, берилію, молібдену, ванадію. Вміст мікроелементів у вугіллі досягає 500 – 600 г/т.

6.2. Фізико-технічні властивості порід

Під фізичними властивостями породи розуміють її особливу поведінку (відповідну реакцію) під час дії на неї відповідних фізичних полів і в тому числі термодинамічних.

Виходячи з цього виділяють механічне поле (тиск) і відповідно йому механічні властивості порід, теплове поле (температура, тепловий потік) і теплові властивості, електричне, магнітне і радіаційне поля і такі ж властивості порід. Крім цього існує речовинне поле (флюїди) і відповідні йому гідравлічні та газодинамічні властивості. Вплив знакозмінних навантажень на гірські породи описується акустичними властивостями, вплив електромагнітних хвиль – електромагнітними властивостями (див. розділ 2).

Гірничо-технологічні параметри порід поділяють на декілька груп за принципом приналежності до окремих процесів технологічного впливу:

- які характеризують загальну зруйнованість порід механічним методом, наприклад, твердість, міцність, в'язкість і подрібнюваність;

- які характеризують руйнівність порід деякими механізмами (буримість, висаджуваність);
- які оцінюються дією породи на інструмент, наприклад, абразивність;
- які оцінюють якість корисних копалин, наприклад, коксівність, термостійкість;
- які встановлюють продуктивність чи ефективність інших процесів дії на гірські породи (окрім руйнівності), наприклад, збагачуваність, стійкість;
- які оцінюють ефективність дії на гірські породи різними немеханічними методами з метою їх руйнування, зміцнення, плавлення (наприклад, термодинамічні дії, електроруйнування).

Фізичні процеси в гірських породах – це явища взаємодії фізичного поля з гірською породою, внаслідок якої виникають і відбуваються різні зміни її складу, будови і стану.

Фізичні властивості та параметри порід, які характеризують ці процеси, поділяються на три групи.

До першої групи входять параметри, які оцінюють оборотні зміни кількості енергії речовини всередині породи (її зростання чи зниження під дією зовнішніх полів). До них відносяться, наприклад: модуль об'ємного стиснення, що характеризує накопичення потенціальної пружної енергії у породі при всебічному її стисненні; діелектрична проникність, яка визначає електроємність порід; питому теплоємність, що оцінює здатність породи накопичувати тепло; вологоємність, яка характеризує здатність породи накопичувати воду тощо.

До параметрів другої групи, що оцінюють необоротні перетворення відповідного виду енергії у породах в інший, відносяться коефіцієнт пластичності, тангенс кута діелектричних втрат, питома теплота плавлення, коефіцієнти поглинання пружних і електромагнітних хвиль, межі міцності, коефіцієнти теплового розширення; електрична і магнітна міцність тощо.

До параметрів третьої групи, які описують процеси передачі енергії, а також переміщення газів і рідин у породах, відносяться коефіцієнт теплопровідності, магнітна проводимість, коефіцієнти проникності і фільтрації тощо. Всі ці параметри залежать від напрямку вимірювань і прикладання поля, тобто мають чітко виражені тензорні величини [19].

Фізичні процеси у породах можуть бути першого роду – коли вони викликані наявністю у породі мінералів, які мають відповідні ефекти, залежно від їх хімічного складу і будови кристалічної решітки, і другого роду, – які виникають у породі внаслідок особливого стану і сполучення мінералів, які самі по собі не мають ефектів, що розглядаються.

До першого роду відносять, наприклад, ефект зростання модуля пружності кварцевмісної породи при температурі вище 573° С (за рахунок поліморфного переходу кварцу); до другого – внутрішні міжзеренні термонапруження під час рівномірного нагрівання породи, які зумовлені різноманітними властивостями мінералів, з яких складена порода.

6.3. Дія зовнішніх полів на властивості гірських порід

Властивості гірських порід визначаються зовнішніми умовами, в яких знаходиться порода. Зміна властивостей порід під дією зовнішніх полів може бути зведена до трьох груп.

1. Зміна сил зв'язків між окремими частинками породи, яка полягає у зниженні останніх під час нагрівання за рахунок наближення стану мінералів до точки плавлення; при насиченні зв'язаних порід водою внаслідок проникнення рідини між частинками породи; зростання їх у процесі нагрівання за рахунок спікання частинок.

2. Зміна складу породи при заповненні пор газами та рідинами; окислення, відновлення при газифікації; дегідратація та дисоціація мінералів при зростанні температури, поліморфні перетворення.

3. Зміна ступеня ущільнення породи шляхом стиснення за рахунок зминання пор, закриття тріщин при стискних механічних навантаженнях під дією опорного тиску, особливо всебічних чи внаслідок внутрішніх термічних напружень під час нагрівання; розпушення, розкриття тріщин під дією розтяжних механічних навантажень чи відповідних сумарних термодинамічних напружень у процесі нагрівання порід; поява додаткової пористості, пустотності за рахунок ефекту вигорання мінералів.

Перевантаження при тих чи інших причин зміни властивостей обумовлено вихідним мінеральним складом, будовою порід і їх фізичними властивостями. Суттєву роль грають також чинники зовнішнього впливального поля (наприклад, газифікація, гідрогенізація) – його інтенсивність, характер.

6.4. Механічні властивості гірських порід

Під дією механічних навантажень змінюються властивості порід.

Пружні властивості визначають поведінку порід тільки у межах пружної зони, тобто під час навантажень, після зняття яких порода повертається у вихідний стан. Пружні зміщення, які виникають у породах під дією короткострокових періодів, можуть розповсюджуватись в об'ємі порід. Хвильовий процес розповсюдження таких зміщень (пружних коливань) називають акустичними властивостями порід.

Міцні властивості визначають величини руйнівних навантажень у породах.

Пластичні властивості порід проявляються під час навантажень, які перевищують межу пружності породи, після зняття яких порода вже не повністю відновлює вихідну форму і розміри.

Реологічні властивості визначають зміни деформацій напружень і перелічених вище механічних чинників порід у часі – при тривалій дії навантажень.

Як відомо, між частинками в кристалічній решітці речовини існують сили взаємного притягання (зчеплення) і сили взаємного відштовхування. Під дією зовнішніх сил, які намагаються зсунути з нейтрального положення частинки в

решітці в один чи другий бік, у породі виникають внутрішні сили, які протидіють зовнішнім.

Поверхнева щільність внутрішніх сил називається напруженням σ ; воно, як і сила, величина векторна:

$$\sigma = dA/dP,$$

де dA – сила, що діє на елемент площини dP .

Напруження виражають у паскалях (Па), $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2 = 1 \text{ кг/м} \cdot \text{с}^2$.

Якщо зовнішні сили діють на породу тільки у напрямку однієї осі, то вони викликають в ній одновісний напружений стан; які діють у напрямку двох осей – плоский напружений стан. Дія сил за трьома осями призводить до об'ємного напруженого стану порід.

Напруження, що направлені перпендикулярно до площини P_1 – нормальні (σ); напруження, що виникли вздовж площини P – дотичними (τ).

Напруження у породах створюються не тільки зовнішніми навантаженнями, а також термічними, які утворюються неоднорідним нагріванням порід. Після зняття діючого поля у породі можуть утворюватись остаточні напруження.

Напруження, при яких розпочинаються пластичні деформації називають межею пружності.

Пластичні деформації у породах обумовлені внутрізерновими і міжзерновими зсувами під дією навантажень.

Із породотвірних мінералів найбільшу міцність має кварц. Межа міцності його досягає 500 МПа, інші залізо-марганцеві мінерали 200 – 500 МПа, кальцит – біля 20 МПа.

Акустичні властивості характеризують закономірності розповсюдження у породах знакозмінних пружних деформацій (пружних коливань).

Процес розповсюдження пружних коливань описують хвильовим рівнянням:

$$v^2 \nabla^2 u = \partial^2 u / \partial t^2,$$

де v – швидкість розповсюдження пружних коливань;

∇^2 – оператор Лапласа ($\nabla^2 = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$);

u – амплітуда пружного зміщення частинок породи;

t – час.

Пружні хвилі за частотою коливань поділяються на інфразвукові – частотою до 20 Гц, звукові – частотою 20 – 20000 Гц, ультразвукові – частотою понад 20 кГц, гіперзвукові – частотою понад 1000 МГц.

Залежно від типу пружних деформацій виділяють хвилі; поздовжні – розповсюдження деформацій змінюваного об'ємного стиску і розтягу у речовині; поперечні – розповсюдження пружних деформацій зсуву. Поздовжні хвилі розповсюджуються у газах, рідинах і твердих тілах. Поперечні хвилі – тільки в твердих тілах, через те що в газах і рідинах опір зсуву практично відсутній.

7. Умови і характер проявів гірського тиску в надрах Землі

7.1. Зміна характеристик і параметрів гірської породи

Початкова суцільність масиву породи характеризується перервністю та неперервністю змін параметрів (щільності тощо), діючих сил, а під час руху маси та її частин – швидкості, прискорення й ін. Існують окремі області гірської породи з окремими лініями, зонами; поверхні чи об'єми з різкою зміною характеристик і параметрів породи. Уявлення про суцільність зближують гірські породи з рідиною. Однак породи не мають легкої рухливості та плинності як у рідин, у них обов'язково існують сили тертя, зчеплення і механічного зачеплення.

Коефіцієнти тертя суттєво змінюються при зміні фізичних умов на поверхні стиснення тіл, що є типовим для гірських порід. Внаслідок грубої шорсткості фактичне стиснення частинок відбувається лише в окремих малих ділянках, площа яких сама залежить від тиску особливо при різномісних частинках і не піддається безпосередньому виміру чи попередньому розрахунку. Тому коефіцієнти тертя, які відносяться до гірських порід, досить грубо й умовно характеризують сили тертя; їх експериментальні виміри у більшості порід практично неможливі [20].

У гірських породах визначну роль грають і молекулярні сили, які діють між молекулами стиснених частин породи, однак їх значимість при відносно малих ділянках стиснення, де можуть виникнути сили молекулярного зчеплення, звичайно незначна.

Суттєву роль відіграють механічні сили, які виникають в окремих зачепленнях, які утворені виступами частинок.

Частини гірських порід складені з різномісних і різномісних мінералів, які мають свою форму, об'єм і ступінь зв'язності з іншими мінералами. Розриви суцільності та форма поверхні частинок і частин породи не можуть бути описані рівняннями; поверхні, по якій відбувається розрив суцільності та поверхні зачеплення теоретично не визначені й відносяться до категорії топографічних. Утворення зачеплень залежить не тільки від ступеня шорсткості зазначених поверхонь, але й від ступеня твердості поверхонь стиснення частинок; виступи більш твердої поверхні вдавлюються в більш м'яку.

З урахуванням практичної неможливості експериментально виміряти у більшості порід кількісні величини коефіцієнтів тертя, коефіцієнтів зчеплення і коефіцієнтів механічного зачеплення для розрахунку тиску гірських порід надалі приймається єдиний експериментально встановлений коефіцієнт зачеплення [21].

Під силами зачеплення розуміється сума сил тертя, зчеплення, механічного зачеплення, які розвиваються у певний час на поверхні стиснення частин масиву гірських порід; відносний їх рух не виникає, поки зсувні сили не перевищать сил зачеплення.

Для цього необхідно знати як виникає і розвивається тиск гірських порід і взаємодія частин масиву і частинок гірської породи визначеного об'єму і форми між собою.

Як вихідні положення можуть бути прийняті наступні:

1. Гірські породи складені з різнорідних твердих частинок (мінералів, кристалів); частинки, в свою чергу, утворюють відносно однорідні блоки, куски або частини масиву.

2. Частинки породи, незалежно від існування внутрішніх дефектів, мають фізико-технічні параметри (наприклад, міцність), яка визначається силами молекулярного зчеплення; тривкість частинок зазвичай у багато разів більша міцності зв'язків між кусками, блоками. Кожен із вказаних елементів обов'язково має свої, більш крупні ніж частинки за розмірами і значимості, дефекти (тріщини, пори), які визначають здатність їх до деформацій.

3. Тверді частинки мають свої конкретні поверхні, форму й об'єми; вони не можуть розглядатися як безрозмірні матеріальні точки з фізико-технічними параметрами (міцністю й ін.), формою й умовами контакту суміжних частинок.

4. Частинки і частини масиву в твердому тілі стикаються між собою і зберігають цільність за рахунок сил молекулярного зчеплення, тертя і механічного зачеплення грубошорстких (часто ламаних) поверхонь; роздільні виміри й урахування цих сил, також, як і контактуючих поверхонь у гірських породах зазвичай неможливі.

Доцільно об'єднати всі ці сили в єдиному понятті сил зачеплення, які перешкоджають переміщенню і зсуву частинок і частин порід, з яких складений масив. Поверхні, на яких відбувається розрив суцільності, зрушення й ін., можна в цьому випадку прийняти за плоскі, циліндричні, конічні і т.д. поверхні з розмірами, що відповідають масштабу частинок чи частин породи.

5. Склад породи зазвичай різнорідний, тому в ньому знаходяться крупні пори, пустоти, тріщини, які заповнені газами чи рідиною; у низці випадків частинки зволожуються плівками газів чи рідини. Масив може вміщувати локальні об'єми зі значно різними параметрами (концентрація газів, рідини, підвищені напруження тощо). Розрахунки сил зачеплення повинні відноситись до висоти стовпа породи, також до форми поперечного перерізу цього стовпа, розмірів і форми частинок і частин його складових. Без дотримання цих умов розрахунки тиску гірських порід неправомірні.

6. Різноманітні дефекти, пори, порожнини, ділянки ослабленої міцності обов'язково є в частинках, частинах і масиві. Їх питома значимість зростає при збільшенні розмірів частинок, частин і масиву прямо пропорційно об'єму. Внаслідок цього міцнісні характеристики породи знижуються, а можливість розриву суцільності, віднесена до одиниці діючих сил, зростає в процесі збільшення об'єму частинок і частин породи.

7. Проміжки між частинками і частинами порід зазвичай, заповнені цементованими породами; частинки і частини більш тривкі, ніж цементувальна речовина, внаслідок чого деформації та розрив суцільності відбуваються переважно в цементованих породах, поверхнях ослаблення і природних тріщинах. У рідких випадках цементовані породи міцніші частинок і частин

створюють як би скелет, заповнений менш міцною речовиною; в цьому випадку міцнісні параметри визначаються в основному характеристиками скелета.

Якщо частинки і частини породи насичені рідиною (яка виконує роль мастила) у такій мірі, що сили зачеплення стають мінімальними, то гірська порода втрачає властивості твердого тіла, може стати текучою і підпорядковується законам гідродинаміки (пливуні, пульпи і ін.).

8. Джерела гірського тиску, як виникають у гірських породах [22]:

- сили першого роду – зовнішні навантаження, у тому числі сили, обумовлені атмосферним і гідростатичним тиском на поверхню породи і, головне, – сили тяжіння частинок, частин і блоків самої породи, які різняться в різних точках об'єму породи, що розглядається; сили першого роду зазвичай вертикальні;
- сили другого роду, які обумовлені “залишковим” напруженням від попередніх тектонічних явищ і раніше виконаних гірничих робіт, тиском від підземних вод і газів, часто мігруючим і ін., а також сили від інженерної дії на породу (нагрівання, підривання, гідравлічна, пневматична та ін.). Ці сили можуть мати різні напрямки у просторі.

Всі гірські породи завжди знаходяться у природному напруженому стані, яке порушується чи змінюється внаслідок ведення вогневих чи гірничих робіт.

9. У масиві чи частинах масиву гірських порід поверхні рівномірного тиску (ізобари) на відміну від гідростатики не є горизонтальними, а мають складні топографічні поверхні з можливістю концентрації сил у локальних об'ємах, які здатні перевищити допустимі для даних порід напруження і призвести до повільних і раптових деформацій при виникненні вільної від ведення гірничих робіт поверхні.

10. Суцільність частинок і частин породи порушується насамперед за рахунок дій сил розтягування ($\sigma_{розт}$ мінімальні), іноді через дію сил зсуву (зрізувальні зусилля), якщо є вільна поверхня у напрямку зсуву, і дуже рідко під час дії стискних сил $\sigma_{ст}$ – максимальні через наявність порожнин і пор. Звичайна схема руйнування – розкриття існуючих і утворення тріщин під час перерозподілу сил і концентрації напружень, які є наддопустимі для даної породи.

11. Тиск гірських порід P на глибині H (від даної поверхні чи від поверхні дна водойми) з тиском P_0 не дорівнює добутку висоти стовпа породи на щільність γ , оскільки у породах на відміну від рідини діють сили зчеплення і тертя з прилеглими твердими тілами, в тому числі з породами. Вони поглинають частину величини $P = H \cdot \gamma$ й обумовлюють вплив стовпа породи, що розглядається на сусідні породи, які обмежують його.

12. Вага частини масиву, який обмежений в деякому об'ємі, завжди відрізняється від загальної суми тиску на підошву цього об'єму за рахунок перерозподілу сил і наявності сил зчеплення з навколишнім середовищем, а також можливої дії природних сил другого роду, зовнішніх для об'єму, що розглядається.

7.2. Процеси зрушення гірських порід під час газифікації

Підземна газифікація вугілля протікає у вміщуючих вугільний пласт гірських породах. У цих умовах породи піддаються термічним діям і розтріскуються, а досягши певних розмірів вигазованого простору починають деформуватися під дією сили тяжіння, осідаючи або обвалюючись і заповнюючи в тій або іншій мірі вигазований простір. Всі ці зміни стану вміщуючих гірських порід, обумовлені технологічним процесом вигазовування вугільного пласта, в свою чергу спричиняють величезний вплив на подальший хід газоутворення в підземному газогенераторі, а також і на кінцевий склад газу та повноту вигазовування вугілля.

Проведені за радянських часів дослідження проявів гірського тиску на закритих станціях «Підземгаз» показали, що слід забезпечити необхідну стаціонарність процесу газоутворення і достатньо повне вигазовування запасів вугілля. Дослідження проводилися в природних умовах шляхом розкриття вигазованого простору гірничими виробками з найближчих шахт. Широке застосування набув метод глибинних реперів, що дозволив отримати низку суттєвих даних про характер і величину деформацій покривних порід і форми вигазовування вугільних пластів.

У лабораторних умовах і за допомогою стендових експериментів нами [28] були вивчені зміни властивостей і структури вміщуючих гірських порід під впливом термічних дій в окислювальній і відновній зонах, вивчені властивості зольного залишку, проведено моделювання процесів зрушення товщі гірських порід.

На пологих пластах породи покрівлі піддаються механічним, тепловим і іншим діям а породи ґрунту піддаються лише нагріву. Нами доведено, що гірські породи володіють вельми низькою температуропровідністю і прогрівання їх за рахунок температуропровідності незначне. Гарячі гази надходять у тріщини покрівлі й нагрівають породи за рахунок конвекції. Проте вже на відстані 2 – 3 м вище за вугільний пласт температура порід не перевищує 200 – 300° С, а на відстані 15 – 20 м зміни температури взагалі не спостерігаються. Таким чином, значні температурні дії випробовують лише невеликі за потужністю пачки порід покрівлі та ґрунту, породні прошарки в потужних вугільних пластах, а також зольний залишок.

Температурні дії також викликають зміни фізико-механічних властивостей порід. У результаті термічної обробки сірої глини, що залягає в покрівлі та ґрунті вугільних пластів, зменшується її об'єм спочатку за рахунок вигорання органічних включень, а потім, при подальшому підвищенні температури – за рахунок спікання, перекристалізації каоліну й інших складних процесів. Після прожарення при температурі 1000 – 1300° С, коли відбувається спікання частинок, спостерігається максимальне зменшення об'єму зразків.

Піскувата глина, що складається з глинозему, кремнезему й інших модифікацій, після прогрівання зменшується в об'ємі за рахунок усадки глинистих речовин, а потім – прагне до збільшення в об'ємі в результаті переходу кварцу в різні модифікації. Залежно від переважання того або іншого

процесу піскувата глина при нагріванні не призводить до утворення тріщин, і відповідно, при такій покрівлі знижуються втрати газу, що утворився, в породах покрівлі. Такі породи дещо зависають у вигазованому просторі.

Характерно, що вапняки в товщі покривних порід не дають зависання і зсовуються одночасно з вміщуючими їх породами.

Загальна схема зсуву порід над вигазованим простором для пологих пластів показана на рис. 7.1. Слід відзначити, що на глибині понад 100 м тріщини в породах покрівлі та верхніх шарах порід, аж до поверхні, не є наскрізними і локалізуються на відносно коротких відстанях. Проте ці тріщини позначаються негативно на стаціонарності процесу газифікації, оскільки вони є тими каналами, які призводять до виникнення обхідних потоків дуття і додатковим тепловтратам у покривних породах.

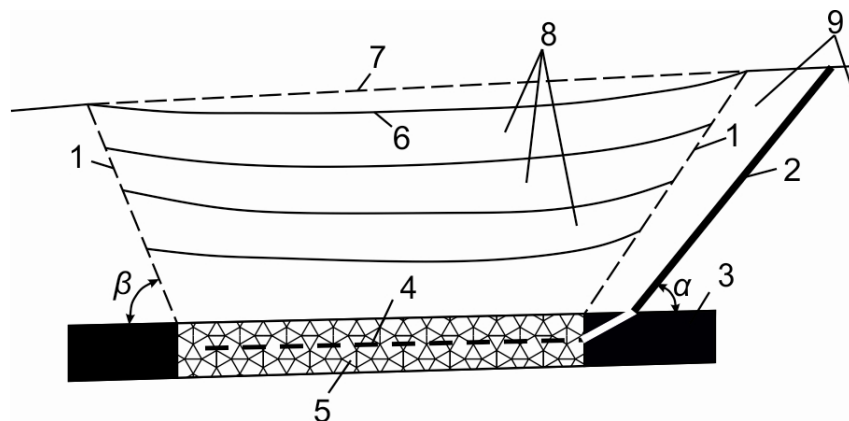


Рис.7.1. Схема зсуву гірських порід над вигазованим простором в умовах пологого падіння пласта: 1 – лінія зсувування деформованих гірських порід над підземним газогенератором; 2 – похила (породна) частина направленої свердловини; 3 – вугільний пласт; 4 – горизонтальна (пластова) частина направленої свердловини; 5 – вигазований простір після вигорання пласта; 6 – крива осідання земної поверхні; 7 – лінія земної поверхні до початку газифікації; 8 – зона повних зсувів деформованих шарів породи; 9 – незайманий і непорушений гірський масив; α_0 – кут буріння похилої (породної) частини направленої свердловини; β_0 – граничний кут зсуву деформованих шарів порід над вигазованим простором

У підземних газогенераторах з низькими міцнісними характеристиками (глинистий сланець, глина, вапняк і ін.) виключають скільки-небудь значне їх зависання над вигазованим простором і це, в сукупності з плавним характером зсуву, забезпечує можливість ведення процесу газифікації з достатнім ступенем стійкості технологічних параметрів без проведення спеціальних штучних заходів щодо керування покрівлею. У той же час тривала експлуатація газогенераторів сприяє розвитку тріщин у породах покривної товщі, що, у свою чергу, погіршує умови стаціонарності технологічного процесу, веде до збільшення витоків дуття і газу в покривні породи.

При роботі газогенератора на збагаченому киснем дутті нижні шари безпосередньої покрівлі оплавляються, розплавлена маса стікає у вигазований

простір, змішується там із зольним залишком і окремими обламками нерозплавленої покрівлі та застигає у такому вигляді, утворюючи у вигазованому просторі шлакове заповнення завтовшки до 1 – 1,5 м. Застигла шлакова маса в більшості випадків є досить міцним монолітом з наявністю дрібних закритих пор.

За характером порушеності зсувного у покрівлі масиву гірських порід можна виділити принаймні три основні зони:

1 – зону безладного обвалення порід, безпосередньо прилеглу до виробленого простору;

2 – зону вигину порід з розривом суцільності, що залягає вище зони безладного обвалення;

3 – зону прогину порід без розриву суцільності.

На крутих пластах Кузбасу (Росія), особливо потужних, зсув масиву гірських порід відбувається інакше. Спостереженнями було встановлено, що у вигазованому просторі відбуваються інтенсивні обвалення порід безпосередньої покрівлі над вигазованим простором.

У зв'язку з невеликою глибиною (10 – 50 м) розташування підземних газогенераторів на крутоспадних пластах, обвалення, що відбуваються в товщі покривних порід, порівняно швидко розповсюджуються до поверхні і призводять до утворення провалів проти кожної дуттьової свердловини. Провали діаметром від 5 до 12 м і завглибшки 8 – 14 м розташовуються над виходом безпосередньої покрівлі вугільного пласта під наноси (рис. 7.2)

Слід зазначити, що безладному обваленню у вигазований простір піддається тільки незначна за потужністю пачка шарів безпосередньої покрівлі газифікованого пласта, звичайно потужність цієї пачки не перевищує потужності самого пласта. Верхні шари порід зсувались впорядковано і вельми плавно. На рис. 7.2 наведена схема вигазовування вугільного пласта і схема деформацій покривних порід, побудована за даними спостережень за зсувом глибинних реперів.

Як видно з наведеної схеми, разом з вигазовуванням вугільного пласта в масиві відбувається обвалення кусків і глиб вугілля у вигазований простір і газифікація їх уже після обвалення.

До утворення провалів витоки дуття і газів, знаходилися на рівні 15 %. У період утворення провалів на поверхні витоки короткочасно зростають унаслідок виходу газу через провали, проте після засипки провалів ґрунтом і глиною, що здійснювалася зразу ж слідом за їх появою, витоки знов знижувались до первинних величин. Таким чином, виявилось можливим вельми нескладними технічними прийомами підтримувати безперервну герметичність підземного газогенератора й усувати тим самим шкідливий вплив обвалень покривних порід на процес підземної газифікації.

Дуттєва сверловина

Газовідвідна сверловина

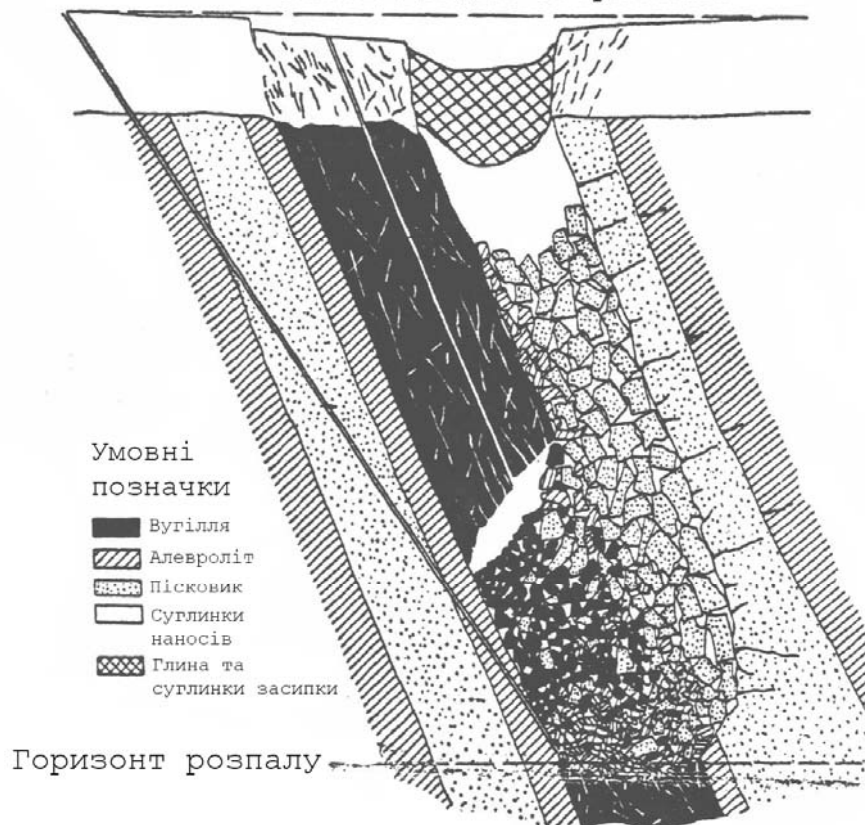


Рис. 7.2. Схема вигазовування вугільного пласта і руху покривних порід на крутому падінні

У той же час сам факт обвалення порід при порівняно невеликих прогінах вигазованого простору і відсутність скільки-небудь значних зависань шарів покрівлі сприяють забезпеченню достатньої стаціонарності технологічного процесу, оскільки не утворюється великих вільних прогінів вигазованого простору і забезпечується необхідна турбулентність дуття і газу.

Тому обвалення порід покрівлі виконує в даних гірничо-геологічних умовах в основному позитивну роль, дозволяючи здійснювати достатньо стійкий процес газифікації без застосування яких-небудь штучних заходів щодо керування покрівлею, за винятком відзначеної вище засипки провалів на поверхні.

Таким чином, при вигазовуванні вугільного пласта і викликаних цим зсувів гірських порід бажано знати характер заповнення вигазованого простору і характер самого процесу зсуву порід, що впливає на герметичність системи. На пологих пластах у міру вигазовування вугілля в окремих випадках відбувається, як показано на рис. 7.1, плавний зсув порід покрівлі без порушення їх суцільності в основному масиві. В інших випадках при значному тріщиноутворенні відбуваються обвалення покрівлі кусками й окремими блоками. В умовах крутих пластів навпаки – при досягненні певного об'єму

вигазовування відбуваються провали з утвореннями воронок на поверхні землі (див. рис. 7.2). В результаті цього погіршується герметичність підземного газогенератора і збільшуються витoki газодуттєвих потоків. Безсумнівно, можливі й інші методи боротьби з обвалами, наприклад, закладка вигазованого простору.

Велике значення для газифікації вугільних пластів мають також питання гідрогеології. Для забезпечення нормального ходу газоутворення в умовах обводнених родовищ (наприклад, Дніпровський буровугільний басейн) виникає завдання керування режимом руху підземних вод. При вирішенні цього завдання необхідно враховувати наступні чинники:

- наявність надмірного тиску як при утворенні збійних каналів (наприклад, при фільтраційній збійці та збійці повітрям високого тиску), так і при здійсненні власне процесу газифікації;
- наявність у газогенераторі високих температур і створення теплового напору, що є певною мірою перешкодою проникненню води до вогневого вибою;
- фільтраційні характеристики гірських порід, що змінюються при газифікації пластів;
- участь у процесі газоутворення певної частини підземних вод, яка змінює склад одержуваного газу за рахунок реакцій розкладання водяної пари і конверсії окису вуглецю.

Таким чином, при газифікації вугільних пластів гірські породи зсуваються, деформуються над вигазованим простором, в них утворюються тріщини, відбуваються зміни хімічного і мінералогічного складу, механічних властивостей, а в деяких випадках навіть агрегатного стану під дією високих температур у зоні газифікації.

Зона обвалення при нестійких породах відстає від лінії вогневого вибою на 0,1 – 0,3 м. При стійкій же покрівлі площа завислого відслонення досягає на окремих ділянках більшої величини й обвалюється на відстані 1,5 – 3 м (рис. 7.3).

Лінія вогневого вибою і контур обвалення порід покрівлі мають складну конфігурацію. Процес обвалення порід покрівлі звичайно відбувається інтенсивніше в зоні дуттьових свердловин ніж у газовідвідних. В обох випадках це веде до різкої зміни поперечного перерізу каналу газифікації по довжині вогневого вибою і негативно позначається на ефективності технологічного процесу газифікації пластів. У зоні безладного обвалення порід покрівлі утворюються додаткові канали по яких рухаються обвідні газодуттєві потоки. В цих умовах процес газифікації дещо погіршується через відсутність контакту дуття кисню зі стінкою вогневого вибою (рис. 7.4).

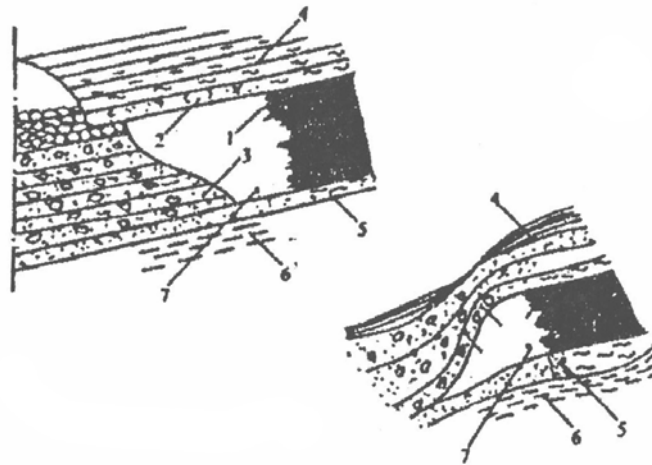


Рис. 7.3. Схема утворення каналу газифікації і деформації порід безпосередньої покрівлі: 1 – розжарене розтріскане вугілля; 2 – випалена порода покрівлі; 3 – закладний масив з обваленими кусками породи; 4 – прогріта порода покрівлі; 5 – випалена порода покрівлі; 6 – слабпрогріта порода ґрунту; 7 – аеродинамічний канал газифікації

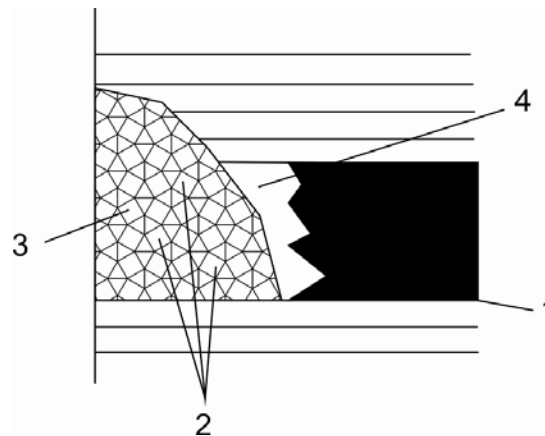


Рис. 7.4. Схема утворення обвідних газодуттєвих каналів: 1 – вугільний пласт; 2 – обвідні канали; 3 – обвалена порода покрівлі; 4 – аеродинамічний канал газифікації

Розширення аеродинамічного каналу газифікації за рахунок обвідних каналів веде також до збільшення втрат вугілля через неповноту його вигорання і вигазовування.

Газифікація вугільних пластів, як відомо, пов'язана з розривом суцільності порід над виробленим простором. Тому на невеликих глибинах може відбутися розгерметизація підземного генератора за рахунок тріщин, просідань, воронки і провалів поверхні землі (див. рис. 7.2), а також зміна гідрогеологічного режиму. Зокрема, можливі з'єднання надвугільних водоносних горизонтів з вигазованим простором газогенератора, витіки дуття, газу і пари в масив гірських порід і розповсюдження газу на значну відстань за рахунок дренажу по тріщинах. Процес газифікації супроводжується також суттєвою зміною хімічного складу підземних вод у зоні підземного газогенератора. Найбільша зміна хімізму вод

спостерігається безпосередньо у виробленому просторі під впливом випаровування підземних вод і розчинення солей водою. Ці зміни відбуваються в результаті розчинення конденсаційною вологою карбонатних порід з подальшим винесенням розчинених солей у водоносні горизонти.

Герметизація підземного газогенератора можлива за рахунок керування покрівлею закладкою виробленого простору дрібнодисперсними відходами сучасного паливно-енергетичного виробництва (золашлаками, хвостами вуглезбагачення, подрібненою шахтною породою й ін.) і зміни структури відслоненого поверхневого шару бічних порід під дією теплового чинника [10]. Герметизація можлива також за рахунок закачування скріплюючих розчинів у міжшарові порожнини порід вище горизонту газифікації [28].

Форма і розміри аеродинамічного каналу газифікації в підземному газогенераторі залежать від повноти закладки виробленого простору і ступеня стійкості покрівлі. Інтенсивність дії газодуттєвих потоків на реакційну поверхню вугільного пласта залежить від форми і розмірів каналів газифікації, які можна регулювати повнотою зведення закладного масиву у виробленому просторі. В цих умовах забезпечується підведення дуття та його взаємодія з нагрітим вуглецем. У результаті знижуються втрати тепла, виділеного в окислювальній зоні, яке витрачається на відновні реакції, тобто на утворення горючих компонентів газу.

Поперечний переріз аеродинамічного каналу підземної газифікації може бути визначений з виразу:

$$S = \sqrt[2.5]{\frac{4,1 \cdot \gamma \cdot l \cdot q^2}{\alpha}},$$

де γ – коефіцієнт опору руху струменя в каналі газифікації, Н·с²/м⁴;

l – довжина каналу газифікації між нагнітальною і газовідвідною свердловинами, м;

q – витрата дуття, що проходить через канал, м³/с;

α – втрата тиску якої-небудь ділянки або всього підземного газогенератора, Па.

Зміна реакційної поверхні каналу газифікації у міру вигазовування вугілля, очевидно, характеризуватиметься відношенням активної його вугільної поверхні S_a до загальної поверхні каналу S , що складається з активної й інертної S_u поверхонь:

$$\beta = \frac{S_a}{S}.$$

Коефіцієнт β характеризує стан реакційної поверхні каналу газифікації в даний момент часу.

Припускаючи, що вугільні стінки каналу є плоскими і, позначивши потужність пласта через m , а середню ширину каналу через b , можемо виразити:

– для каналу з двома вугільними стінками:

$$\beta = \frac{S_a}{S_a + S_u} = \frac{2m}{2m + 2b}$$

або
$$\beta = \frac{1}{1 + \frac{b}{m}};$$

для каналу з однією вугільною стінкою

$$\beta = \frac{1}{2 \cdot \left(1 + \frac{b}{m}\right)}.$$

Визначимо, що для первинного каналу газифікації (з усіма вугільними стінками) коефіцієнт β дорівнює одиниці; у міру ж збільшення ширини каналу β зменшується, що означає погіршення умов реагування.

Але у міру збільшення ширини вигазованого простору і збільшуваного відслонення покрівлі вугільного пласта, відбувається зсув порід покрівлі, їх розпушування і більш або менш повне заповнення вигазованого простору. Характер зсуву порід і ступінь заповнення вигазованого простору визначаються геологічною структурою родовища і фізико-механічними властивостями гірських порід. Обвалені породи, якими заповнюється вигазований простір, є певною мірою перешкодою руху газодуттєвого потоку в інертній частині каналу. Це сприяє напрямку потоків газу до вугільної стінки і є стабілізуючим чинником процесу газифікації.

В умовах крутих пластів при досягненні певного об'єму вигазовування відбуваються провали з утворенням воронок на поверхні землі (див. рис. 7.2). У результаті цього погіршується герметичність підземного газогенератора і збільшуються витoki газодуттєвих потоків.

Таким чином, обвалення порід покрівлі грає дуже важливу роль і дозволяє стабілізувати процес газифікації або навпаки погіршити стійкість процесу газифікації. Тоді необхідно застосувати які-небудь штучні заходи щодо керування гірським тиском.

7.3. Геомеханічні процеси під час газифікації вугільних пластів

Керування гірським тиском у період газифікації визначається комплексом спеціальних заходів, які забезпечують стійкість бічних порід у підземному газогенераторі для стабільного одержання генераторного газу і повного вигазовування вугільного пласта.

Обвалення порід покрівлі у підземному газогенераторі залежить від структури вугільного пласта і вміщуючи порід, взаєморозташування цих порід, а також закономірностей і характеру деформацій верхньої товщі порід над підземним газогенератором. Бічні породи грають роль стінок корпусу газогенератора, разом з тим корпус зазнає значних змін у процесі вогневих робіт. Гірські породи зсуваються, деформуються над вигазованим простором, в них утворюються нові тріщини, пори, відбуваються зміни хімічного і мінералогічного складу, механічних властивостей і фазового стану під дією високих температур.

У цьому випадку важливо правильно вибрати стратегію освоєння родовища, яка повинна базуватись на принципі недопустимості створення промислових об'єктів за відсутності повної гарантії екологічної безпеки.

Вихідними даними до розробки ефективності технології газифікації вугільних пластів слугують критерії, які мають взаємозв'язок з екологічними аспектами процесу газифікації. До основних вихідних положень, які визначають напрями розвитку газифікації, відносяться наступні:

1. Обвалення порід покрівлі над вигазованим простором носять стихійний характер.

2. Ефективний процес газифікації вугілля може бути виконаний за рахунок розкриття вугільних пластів направленими свердловинами (похило-горизонтальними), використання направленою подавання дуття на реакційну поверхню масиву вугілля і відпрацювання газифікованих ділянок зворотним ходом, від вибоїв направлених свердловин до їх устя, з застосуванням високого тиску у підземному газогенераторі.

3. Інтенсивність впливу дуття на реакційну поверхню пласта залежить від розмірів каналу газифікації, який повинен регулюватись повнотою зведення закладної маси у вигазованому просторі. В цьому випадку забезпечується інтенсивна взаємодія з розпеченим вуглецем і утворення горючих компонентів генераторного газу.

4. Під час закладання вигазованого простору відбувається підвищення теплотворної здатності генераторного газу, знижуються втрати теплової енергії на нагрівання обвалених порід. Зростає повнота відновних реакцій за рахунок сприяння інших параметрів підземного газогенератора (висока температура, довжина вогневого вибою, реакційна здатність вугілля, відношення площі вогневого вибою пласта до відслоненої поверхні бічних порід тощо).

5. Герметизація підземного газогенератора можлива за рахунок керування покрівлею закладанням виробленого простору дрібно-дисперсними відходами сучасного паливно-енергетичного виробництва (подрібнена шахтна порода, золошлаки, хвости вуглезбагачення тощо). Герметизація суттєво зменшує водоприплив у зону газифікації, знижує забруднення підземних вод, а також запобігає витоку газу і дуття у верхні тріщинуваті породи.

Для забезпечення стійкого технологічного процесу газифікації слід визначити розмір необхідного поперечного перерізу каналу газифікації.

Втрата енергії дуттьового потоку на подолання тертя в каналі визначається з виразу:

$$\tau = \frac{k \cdot P \cdot l \cdot Q}{F^3}, \quad (7.1)$$

де τ – втрата тиску на якій-небудь ділянці чи усього підземного генератора, Па;

k – коефіцієнт опору руху потоку в каналі газифікації, Н·с²/м⁴;

P , F – відповідно периметр і площа поперечного перерізу каналу газифікації, м і м²;

l – довжина каналу газифікації між нагнітальною і газовідвідною свердловинами, м;

Q – витрата дуття, яке проходить через канал, м³/с.

Периметр P каналу газифікації визначається за відомою формулою:

$$P = 4,16 \cdot F^{0,5}. \quad (7.2)$$

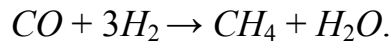
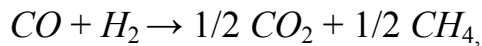
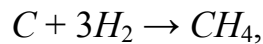
З урахуванням виразу (7.2) формула (7.1) має вигляд

$$\tau = \frac{4,16 \cdot k \cdot l \cdot Q^2}{F^{2,5}}.$$

Поперечний переріз каналу газифікації може бути виражений формулою:

$$F = \sqrt[2,5]{\frac{4,16 \cdot k \cdot l \cdot Q}{\tau}}.$$

6. Одночасно з цим достатній тиск у герметичному підземному газогенераторі та наявності пластової води у вугіллі створює, як відзначено вище, сприятливі умови для одержання заміни природного газу – метану за рахунок наступних реакцій:



Високий вихід метану підвищує споживацькі властивості генераторного газу до 30 – 35 МДж/м³. При цьому тиск газифікувальних агентів у підземному газогенераторі може підтримуватись на достатньо високому рівні за умови, що не буде перевищено гідростатичний тиск з метою уникнення гідропневморозриву порід з виходом газу на денну поверхню.

Підземна газифікація вугілля на незначній глибині в герметичних газогенераторах при достатньому тиску газифікувальних агентів забезпечує вироблення генераторного газу з високим вмістом метану (CH_4) і незначною кількістю вуглекислого газу (CO_2). Останній легко виділити звичайними методами (шляхом відмивання водою чи перепуском через мембранні фільтри), а горючий склад газу використати у парогазовому циклі турбін для одержання електро- і теплоенергії.

Відокремлений на поверхні газ CO_2 можна використати повторно. Для цього його направляють у складі дуття знову в підземний газогенератор, де під дією високої температури він трансформується в горючий газ – монооксид вуглецю (CO). Це один із методів боротьби з парниковим ефектом, який нами рекомендується. Окрім цього, можна направляти у підземний газогенератор газові відходи сучасного паливно-енергетичного виробництва (димові гази ТЕЦ, ТЕС, промислових і комунальних котелень тощо).

Перехід від експлуатації підземних газогенераторів при низькому тиску (0,01 МПа) до роботи під високим тиском (0,8 – 2 МПа і більше) – новий крок у напрямі покращення техніко-економічних показників газифікації вугільних пластів на невеликих глибинах. З точки зору охорони довкілля технологічна схема СПГВ, що рекомендується, з очевидністю показує, що вона пов'язана з герметичністю газогенератора, з обмеженим водоприпливом і витіканням газодуттєвих потоків, і забезпечує підвищений вихід генераторного газу, повноту газифікації вугілля, збільшення теплотворної здатності газу, а також значно зменшення використання дуття на одиницю виробленого газу. Окрім

цього, закладний матеріал суттєво знижує від'ємний вплив деформації гірських порід на земну поверхню (див. рис. 5.1).

7. Розкриття дільниць, які підлягають газифікації з високим тиском на невеликій глибині, також виконується направленими свердловинами в більш сприятливих умовах; бурові роботи проходять на невеликій глибині високими темпами з невеликими витратами засобів, внаслідок чого ліквідуються ускладнення, які звичайно мають місце при буторинні на великих глибинах. Результатом цього є вигрaш у часі на підготовку газифікованих дільниць і скорочуються початкові капітальні витрати.

8. Під час газифікації з закладанням вигазованого простору деформації порід покрівлі незначні. Якщо ж, в деяких випадках, нестійка покрівля і буде обвалюватись, то закладний матеріал буде надходити у пустоти між обваленою безпосередньою покрівлею й основною покрівлею, яка буде підбутовуватись обваленою породою і закладним матеріалом. При такій системі газифікації обвалена порода безпосередньої покрівлі і закладний масив не тільки не порушують процес СПГВ, але, навпаки, безперервно забезпечать надійну герметичність підземного газогенератора на рівні оплавленого шару основної покрівлі.

9. Порядок газифікації вугільного пласта зворотним ходом дозволяє ефективно впливати повсякчасно на роботу підземного газогенератора для покращення якості генераторного газу та збільшення продуктивності виробництва.

10. Добре вирішується проблема чистоти підземних вод. Знижується ступінь випаровування підземних вод і розчинення солей в умовах високих температур.

11. Скорочуються втрати не газифікованого вугілля від неповноти вигазовування, бо у міру утворення виробленого простору у підземному газогенераторі між закладним масивом і реакційною поверхнею вугільного пласта утворюється вузький аеродинамічний канал, в якому рухаються газодуттєві потоки. Вони постійно взаємодіють з вогневим вибоєм і забезпечують ефективність окислювально-відновних реакцій у найбільш сприятливих теплових умовах.

12. Газифікація вугільного пласта з закладанням породи і при безперервному оплавленні шару бічних порід та їх закалювання в аеродинамічному каналі та вигазуваному просторі забезпечують герметичність діючого підземного газогенератора, при цьому втрати дуття і газу зводяться до мінімуму [11].

13. Надійна герметичність підземного газогенератора і ведення технологічного процесу газифікації вугільних пластів з закладанням вигазованого простору дозволяє одержати газ з теплотворністю 5,5 – 6,2 МДж/м³ – високий показник для газогенераторного процесу на повітряному дутті. При інтенсифікації процесу СПГВ киснем, паром, діоксидом вуглецю, підвищенні тиску, а також реверс дуття й ін. теплотворна здатність зросте до 12,6 – 19,2 МДж/м³.

7.4. Особливості утворення температурних зон навколо вогневого вибою

Температурні зони у вугільному пласті. Під час газифікації вугільного пласта осередок горіння посувається в процесі вигорання вугілля і за аналогією підземної розробки вугільного пласта став називатись вогневим вибоєм. Подаючи у вогневий вибій дуття кисень підтримує в ньому горіння вугілля, а точніше вуглецю, внаслідок чого поступово створюється висока температура, яка сприяє неповному згорянню вугілля й одержанню газу, який може горіти при послідовному підведенні кисню.

Під дією температури у вугіллі та бічних породах відбувається зміна фізико-хімічних характеристик вугілля і породи навколо вогневого вибою (рис. 7.5).

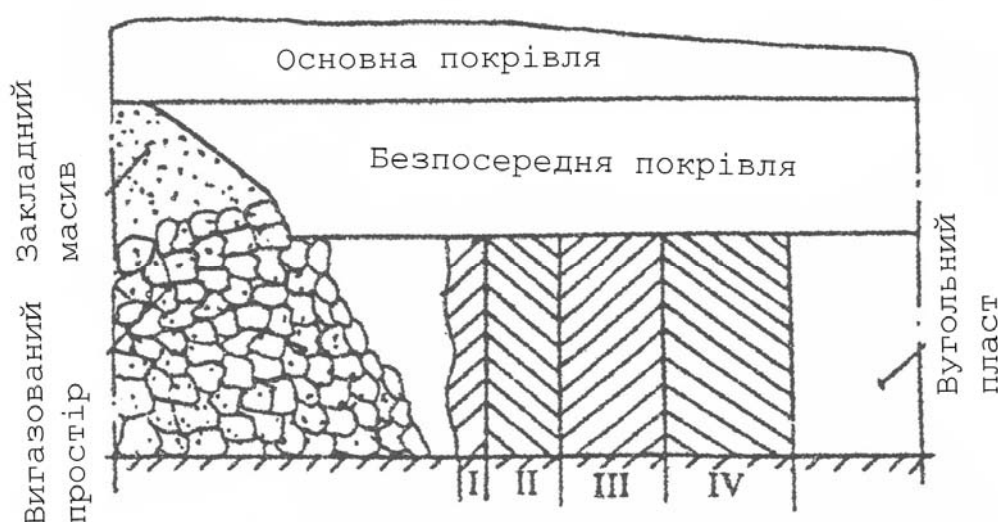


Рис. 7.5. Розподіл реакційних зон за підняттям вугільного пласта:
I – зона газифікації; II – зона коксування; III – зона напівкоксування;
IV – зона підсушування вугілля

Під час початкового підвищення температури в масиві вугілля розпочинається його підсушування. Волога починає випаровуватись при температурі 100°C і закінчується при нагріванні вугілля до $200 - 250^{\circ}\text{C}$, до того ж при температурі понад 150°C починає виділятися і хімічно пов'язана волога, яка утворилася з водню, кисню і бічних порід. При температурі понад 250°C прогрівання вугілля у масиві супроводжується значним виділенням газів і смол, які виділяючись, залишаються у капілярних пустотах вугільного масиву.

Виділення газів відбувається у наступному порядку: спочатку виділяються кисневмісні елементи – CO і CO_2 , пізніше CH_4 і важкі вуглеводні і потім H_2 , який звичайно виділяється більш інтенсивно при підвищенні температури. Найбільш енергійно виділення газів відбувається при зростанні температури

вище 500°C (процес напівкоксування). Виділення смол, яке розпочалось при температурі 250°C досягає свого максимуму в межах $300 - 350^{\circ}\text{C}$ і закінчується при температурі близько 450°C .

При температурі понад 800°C відбувається процес коксування вугілля, воно пом'якчується і стає пластичним, причому в'язкість вугілля залежить як від хімічного складу вугілля і золи, так і від їх фізичної будови. Збільшення складу золи у вугіллі зменшує пластичність вугільної маси, а при зростанні зольності та наявності слабоспінного вугілля вугільна маса, проходячи стадію коксування, може зберігати твердість не пом'якшуючись.

На пом'якшення вугілля в період коксування безумовно впливає і тиск верхньої товщі порід. Цей тиск ущільнює пластичні шари породи і утруднює подальше розм'якшення коксівного чого шару вугілля, затримуючи процес.

Вище 1000°C при доступі кисню вугілля горить, залишаючи золу [24].

Тепло, яке виділяється під час горіння вугілля, в основному видаляється з відхідними пазами і тільки невелика його частина поглинається вугільним масивом і прилеглими гірськими породами. Це тепло, проникаючи вглиб вугільного масиву, викликає термічні зміни вугілля у масиві. Таким чином, разом з прогріванням деякої товщі масиву вугілля навколо вогневого вибою з'являються ділянки місцевого прогрівання вугільного пласта, які називають зонами термічних змін вугілля у масиві.

Першою зоною позаду реакційної поверхні горіння вглиб масиву є зона коксування, яка має температуру до 800°C . Щільна маса вугілля цієї зони є стіною, яка перегороджує вихід летких газів і пари з глибини вугільного масиву до реакційної поверхні горіння. Місцями ця зона руйнується внутрішнім тиском газів чи гірським тиском у масиві, і після цього частина внутрішніх газів з пласта потрапляє у зону горіння. Оскільки, на межі вигорілого простору тиск покривної товщі порід зростає, то ця частина вугільного масиву більше стиснена, і пласт перед повним вигоранням трохи зменшує свою потужність.

Наступною за зоною коксування розпочинається зона сухої перегонки, в якій виділяються леткі гази. Ця зона насичена газами і парою, які знаходяться як у зв'язаному стані, так і у вигляді газу, що заповнює пори, тріщини і порожнини між частинками вугілля. Зона виділення газів і смол поступово переходить у наступну – зону випаровування вологи. Ця частина вугільного пласта насичена водяною парою, до якої примішуються в деякій кількості і гази сухої перегонки.

Найбільш глибокопроникливе в масив тепло йде просто на підігрівання вугілля. Таким чином, можна зробити висновок про те, що розподіл температур у вугільному масиві відповідає і розподілу зон температурних змін вугільного масиву (табл. 7.1).

Таблиця 7.1

Розподіл температурних зон у вугільному пласті

№ п/п	Процес	Температура, °С	Зона температурних змін
1	Підігрівання вугільного масиву	< 100	Підігрівання
2	Випаровування природної вологи	100 – 250	Випаровування
3	Виділення кисневмісних газів	250 – 300	Випаровування
4	Виділення смол, газів, вуглеводнів	300 – 900	Випаровування
5	Напівкоксування вугілля	400 – 500	Суша перегонка
6	Коксування вугілля	500 – 800	Коксування
7	Газифікація вугілля на реакційній поверхні	900 – 1300	Горіння

Кожна попередня зона поступово переходить у наступну (див. рис. 7.5).

Температурні зони навколо і всередині каналу газифікації. В різних точках газодуттєвого каналу прогрівання масиву вугілля і прилеглих порід неоднаково і залежить від тих теплових джерел, за рахунок яких відбувається прогрів порід. Так, в окислювальній зоні каналу газифікації прогрівання вугільного масиву відбувається головним чином за рахунок окислювальних реакцій вогневого вибою, тоді як у відновній зоні прогрівання стінок каналу відбувається за рахунок тепловіддачі газового потоку, який утворився в окислювальній зоні [11].

Посування полум'я і газового потоку підпорядковується основним законам гідростатики і гідродинаміки. Тому полум'я й нагріті у вогні продукти газифікації значно легше за повітря чи дуттєві компоненти. Вони намагаються заповнювати верхні частини каналу газифікації, як би перемішуючись на більш важких газах, причому переріз газового потоку має сегментну форму, обернену випуклістю догори. Із цього виходить, що найбільш висока температура у даному потоці буде біля покрівлі поперечного перерізу каналу газифікації. З цієї ж причини і поглинання тепла прилеглими породами буде сильніше біля покрівлі, ніж у боках, і найменше біля підосви каналу. Тому в період підземної газифікації породи покрівлі вугільного пласта наражаються на найбільші термодинамічні зміни своєї структури, тоді як підосва одержує лише незначне випалювання.

Вогневий потік полум'я і газів рухається у каналі і піддає породи підосви й особливо покрівлі вугільного пласта термодинамічній дії на всій довжині каналу. Орієнтуючись на такий рух потоку полум'я і газу, можна уявити собі поперечний переріз каналу, який складений із двох зон: у верхній частині каналу утворюється високотемпературна зона, а в нижній – низькотемпературна.

А залежно від основних процесів газифікації, переважаючих у газодуттєвому потоці при його проходженні через канал газифікації, сам канал може бути розділений по довжині на зону горіння (окислювальну зону) і зону відновлення, де відбуваються відновні процеси.

Горіння вугілля на стінці каналу створює всередині його специфічне температурне поле. На базі експериментальних даних, одержаних на стендовій установці й джерела [11], орієнтовно можна уявити собі можливе розповсюдження температур всередині каналу газифікації.

У верхній частині поперечного перерізу каналу температура завжди більш висока, ніж у нижніх частинах цього ж перерізу, і через те що джерелом тепла є розпечена стінка вугільного пласта, то ізотермічні криві температур поперечного перерізу каналу трохи зсуваються в бік вугільної стінки.

Для пологих пластів ізотермічні криві у стінках поперечного перерізу каналу газифікації мають наступний вигляд. За законом течії полум'я і гарячих газів у вигляді випуклого сегмента, верхня частина поперечного перерізу каналу газифікації буде місцем найбільшої інтенсивної газифікації, хоча процес горіння вугілля відбувається на бічній стінці поперечного перерізу каналу. Тому для пологих пластів ізотермічні криві поперечного перетину каналів газифікації орієнтовно (за експериментальними даними стендових випробувань, а також до одержання дослідних даних у натурних умовах) можна навести на рис. 7.6.

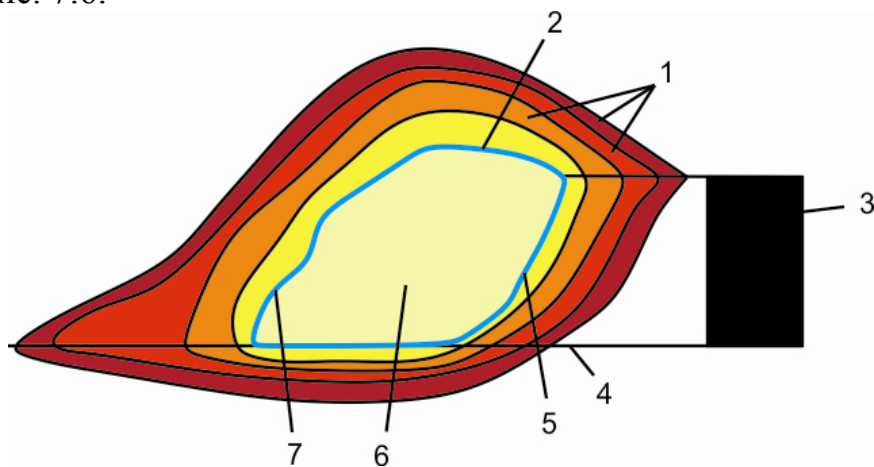


Рис. 7.6. Схема утворення температурних зон у масиві під час газифікації пологих пластів:

- 1 – температурні (ізотермічні) криві;
- 2 – покрівля каналу газифікації;
- 3 – вугільний пласт під час газифікації;
- 4 – підошва пласта;
- 5 – реакційна поверхня вогневого вибою (дзеркало горіння);
- 6 – канал газифікації;
- 7 – обвалена порода з закладним матеріалом

Як бачимо із рис. 7.6, порода безпосередньої покрівлі вугільного пласта протягом доволі тривалого терміну знаходиться під дією високих температур і поглинає багато тепла.

Для крутих пластів розташування ізотермічних кривих у стінках поперечного перерізу каналу газифікації має трохи інший вигляд. Можна припустити, що ізотермічні криві у поперечному перерізі каналу у стінках по його перерізу матимуть наступний вигляд (рис. 7.7).

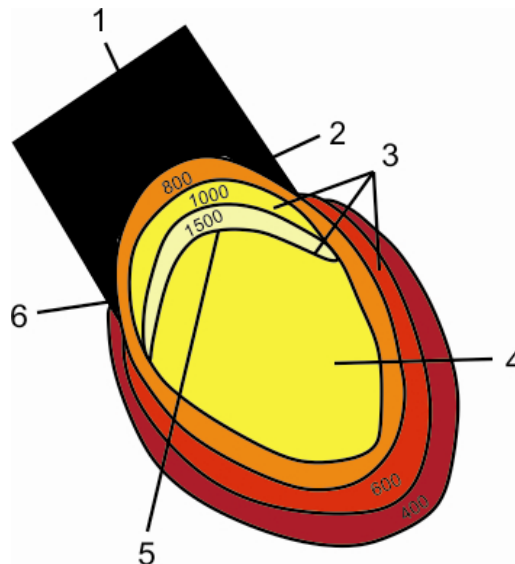


Рис 7.7. Схема утворення температурних зон у масиві під час газифікації крутих пластів: 1 – вугільний пласт; 2 – покрівля пласта; 3 – ізотермічні криві; 4 – канал газифікації; 5 – реакційна поверхня (дзеркало горіння) вогневого вибою; 6 – підосва пласта

Такий розподіл температурних зон завідома визначає і форму перерізу каналу, бо у цьому випадку вугільний масив одержуватиме більшу кількість тепла ніж на пологих пластах. Одночасно з цим породи безпосередньої покрівлі та підосви вугільного пласта одержують основне тепло не в середній частині поперечного перерізу каналу, а у верхній.

Розподіл температурних зон у самому каналі газифікації залежно від кута падіння вугільного пласта можна уявити наступним чином. Найбільш висока температура в осередку газифікації – вогневому вибої – для окислювальної зони буде на реакційній (палаючій) поверхні вугільного пласта (рис. 7.8).

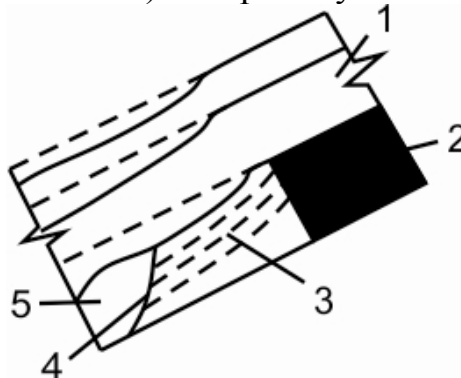


Рис. 7.8. Схема утворення вогневого вибою в окислювальній зоні:
1 – безпосередня покрівля; 2 – вугільний пласт; 3 – зона прогрівання вугільного пласта; 4 – реакційна поверхня (дзеркало горіння) вогневого вибою; 5 – вогневий простір

Навколо цієї поверхні будуть розташовуватись ізотерми менш високих температур, при цьому їх розташування залежить від кута падіння вугільного пласта (рис. 7.9).

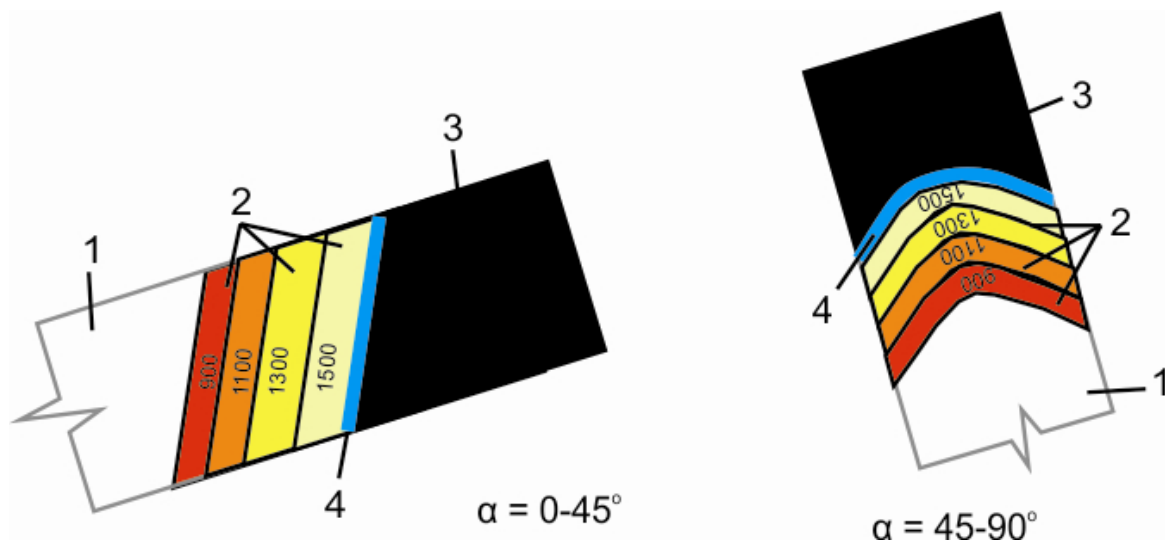


Рис. 7.9. Схема утворення температурних зон всередині каналу газифікації в окислювальній зоні під час ламінарного руху дуття залежно від кута падіння пласта: а – при кутах падіння пласта $0 - 45^\circ$; б – при кутах падіння пласта $45 - 90^\circ$; 1 – канал газифікації; 2 – ізотермічні криві; 3 – вугільний пласт; 4 – вогневий вибій (дзеркало горіння)

Зі зростанням швидкості руху газодуттєвого потоку до турбулентного розташування ізотерм в каналі газифікації суттєво змінюється. Навколо вогневого вибою ще залишається своє деяке невелике температурне поле, тоді як увесь основний переріз каналу газифікації заповнений турбулентним газодуттєвим потоком, який має високі температурні зони (рис. 7.10 і 7.11).

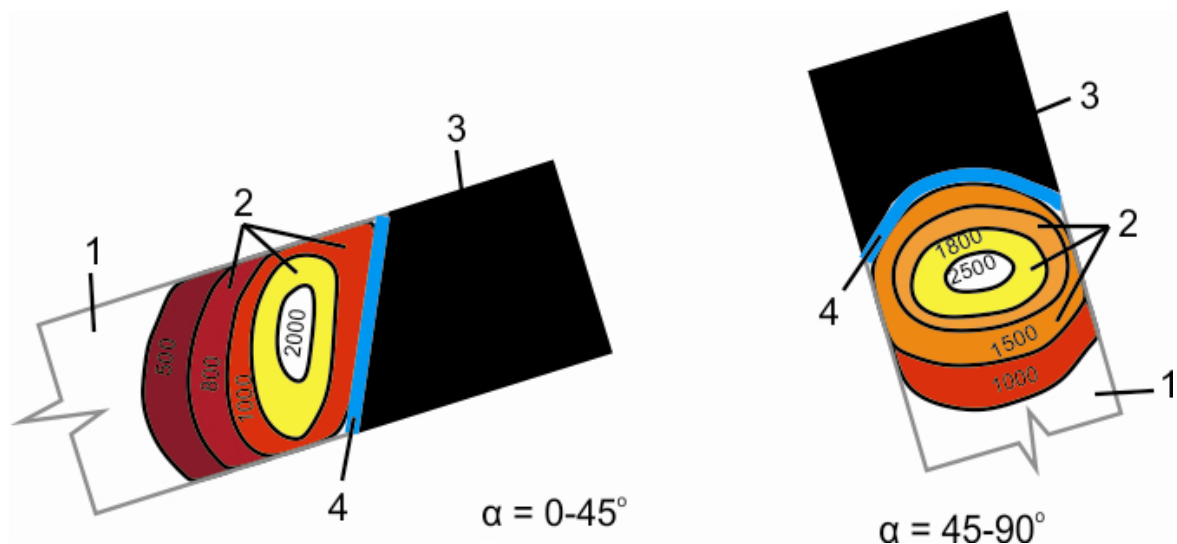


Рис. 7.10. Схема утворення температурних зон всередині каналу газифікації в окислювальній зоні під час турбулентного руху газодуттєвих потоків: а – при кутах падіння пласта $0 - 45^\circ$; б – при кутах падіння пласта $45 - 90^\circ$; 1 – канал газифікації; 2 – ізотермічні криві; 3 – вугільний пласт; 4 – вогневий вибій (дзеркало горіння)

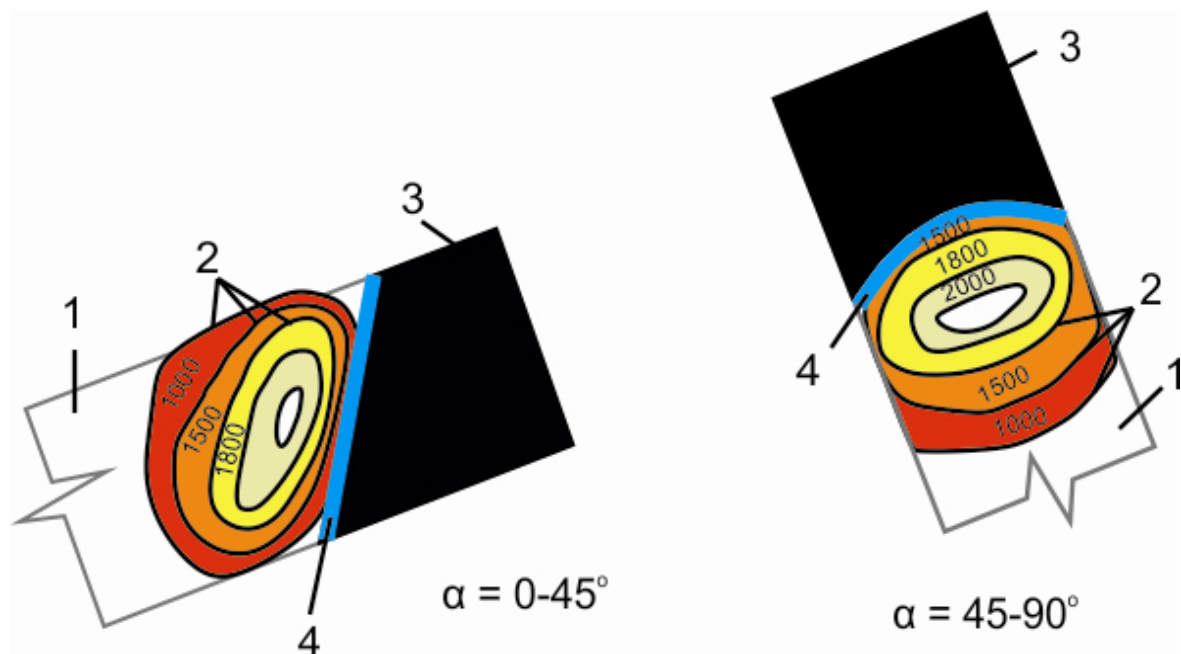


Рис 7.11. Схема утворення температурних полів у відновній зоні під час турбулентного руху газових потоків: а – при кутах падіння пласта $0 - 45^\circ$; б – при кутах падіння пласта $45 - 90^\circ$; 1 – канал газифікації; 2 – ізотермічні криві; 3 – вугільний пласт; 4 – вогневий вибій (дзеркало відновних реакцій)

Під час реверсу процесу газифікації, коли змінюється напрямок руху газодуттєвого потоку, де окислювальна зона стає відновною і навпаки, температурні поля в цих зонах не змінюватимуться і відповідатимуть зонам, наведеним на рис. 7.9 – 7.11.

Утворення фільтраційної зони в каналі газифікації. Вищенаведені подання про температурні поля навколо вогневого вибою відносяться до газифікації низькозольних вугільних пластів. У період газифікації високо-зольних пластів (особливо бурого вугілля) переріз каналу газифікації буде заповнено зольною решіткою.

Процес підземної газифікації відбуватиметься в деякому утворенні в каналі газифікації, але не у вільному, а в заповненому газопроникною зольною подушкою.

З одного боку цей канал буде обмежений вугільним масивом, а з другого – вигорілим простором, який заповнюється зпресованою золою, шлаком і обваленими породами із закладним матеріалом (рис. 7.12).

Досвід газифікації на стендовій установці показав, що при температурах нижче температури плавлення золи, вона покриває дзеркало горіння пористою оболонкою 7 і погано здувається навіть при високій швидкості газодуттєвого потоку. Накопичення пористої зольної решітки 7 великої товщини мабуть не матиме місця при застосуванні пульсаційного режиму дуття, а також під впливом гірського тиску, бо обвалення покрівлі 4 буде спочатку зпресовувати решітку, а пізніше й руйнувати її.

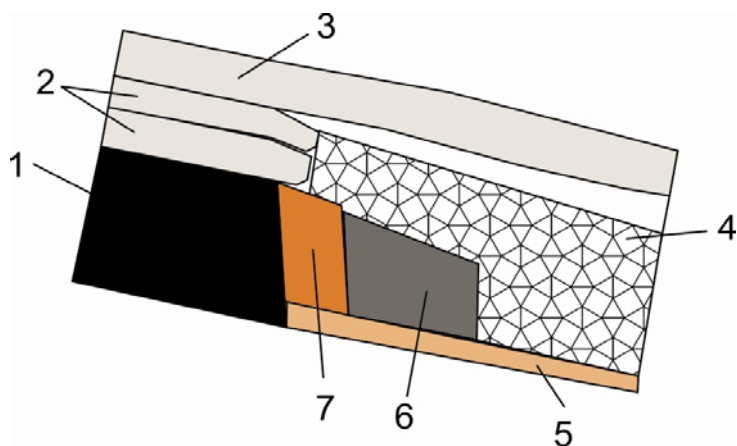


Рис. 7.12. Схематичний розріз по фільтраційному каналу: 1 – вугільний пласт; 2 – безпосередня покрівля; 3 – основна покрівля; 4 – обвалені породи безпосередньої покрівлі з закладним матеріалом; 5 – шлак; 6 – зпресована зола; 7 – фільтраційний канал (пориста зольна решітка)

Зпресування зольного скелета покривними гірськими породами і поступове осадження останніх відбудеться внаслідок зменшення у багато разів опору зольного скелета роздавлюванню у порівнянні з вугільним масивом 1.

Очевидно, при зростанні товщини зольної оболонки сумарна швидкість газифікації буде зменшуватись.

Із цього випливає, що треба навчитись боротись із зольною оболонкою і краще навіть навчитись керувати її утворенням. Боротьба з утворенням зольної кірки і керування нею можливе тепер тільки плавленням золи температурним полем у вогневому просторі.

Таким чином, можна зробити висновок, що найбільш раціональними режимами підземної газифікації високозольних вугільних пластів будуть режими з рідким станом шлаку 5 (див. рис. 7.12), або з застосуванням пульсаційного режиму дуття [25].

При цьому такі пласти необхідно відпрацьовувати за підняттям. У процесі вигазовування вугілля шлак 5 стікатиме донизу за падінням пласта. У протилежному випадку шлак накопичуватиметься на підшві пласта і поступово буде виводити нижню пачку вугільного пласта зі сфери стискання з киснем дуття. Пласт буде вигазовуватись у верхній частині до тих пір поки шлак не підійде до покрівлі й не заблокує повністю процес газоутворення.

Із вищенаведеного ясно, які серйозні перешкоди створює шлакоутворення горизонтальних високозольних вугільних пластів при їх підземній газифікації.

В умовах негоризонтальних пластів із цим явищем можна успішно боротись через одержання рідкого легкорухливого шлаку, який стікатиме із дзеркала горіння і на підшві пласта у вигазований простір.

Основним заданням під час газифікації високозольних пластів (понад 20 %) є створення умов, які забезпечують процес горіння при високій температурі, що дозволяють плавити шлак і гранулювати його холодним дуттям.

При підземній газифікації методом фільтрації дуття проникає через пористий скелет (шлак) 7 (див. рис. 7.12) і нагрівається, при цьому одночасно

охладжує шлак. Нагрівання дуття в свою чергу сприяє підвищенню температури у зоні горіння. Така регенерація теплової енергії повинна дозволити вигазовувати високосольне вугілля методом фільтрації, яке за іншими методами через втрати теплової енергії зі шлаком при повітряному дутті погано вигазовується.

7.5. Контроль і керування тепловою аномалією в період газифікації вугілля

Забезпечити роботу підприємств підземної газифікації вугілля в оптимальних умовах можливо тільки на основі чітко поставленого контролю і керування генераторним процесом. Цим питанням приділялась велика увага при дослідженні процесів СПГВ. Пошуки проводились у різних напрямках, при цьому використовувались такі методи: електричний, гравіметричний, магнітний, термічний, маркшейдерський, сейсмічний. Найбільш розроблений термічний метод, однак він не дає можливості швидко, легко і точно визначити місцезнаходження вогневого вибою з поверхні землі і вимагає значних матеріальних витрат.

Заслужовує уваги комбінований метод сейсморозвідки і радіолокації хвилями, які відбиваються з підземного газогенератора, а також метод електропровідності порід під час газифікації. Ці методи можуть приблизно визначити розміщення осередку горіння, характер його переміщення і кількість дуття, необхідного для нормального процесу газифікації. Результати аналізу показали, що у більшості випадків за підконтрольні величини приймають один чи декілька параметрів процесу, які несуть в собі усереднену інформацію про динаміку його розвитку. Наприклад, температурні аномалії, які хоча й переміщуються в тому ж напрямку, що і вогневий вибій пласта, його місцеположення визначають однозначно під впливом теплових джерел. Таким джерелом може слугувати тепла аномалія, яка виникає у покривних породах від штучного джерела тепла і розповсюджується до денної поверхні, де вона може бути зафіксована спеціальним датчиком – тепловізором.

Переміщення зони горіння в пласті обумовлює переміщення теплової аномалії у приповерхневих шарах землі.

Фіксуєючи відносну зміну величини теплової аномалії та розподіл на площі ділянки газифікації, можна судити про швидкість переміщення зони горіння і місцезнаходження її в різний час, а це дає основу для коректування процесу СПГВ зміною параметрів дуття для ведення процесу газифікації в оптимальному режимі й одержання генераторного газу підвищеної теплотворності. На основі даних про місцезнаходження зони горіння планують буріння нових технологічних свердловин.

Цей метод контролю дає можливість оперативно, тобто швидко, надавати інформацію про зміни ситуації у підземному газогенераторі в короткий термін з моменту початку такої зміни. Наприклад, поява в пласті штучного джерела тепла (зони горіння) в момент часу t_1 викличе прояв відповідної теплової аномалії, що реєструється у приповерхневому шарі землі над місцезнаходженням цього джерела в момент часу $t_2 = t_1 + \Delta t$. Тут Δt – час, який

характеризує оперативність методу дистанційного контролю, що залежить від швидкості розповсюдження теплової аномалії (мінімальний за величиною, але можливий для реєстрації) у покривних породах, яка визначається механізмом теплопереносу.

Якщо пояснювати механізм теплопереносу у покривних породах, що є дисперсним середовищем, тільки теплопровідністю, то за приблизними розрахунками для $\Delta q = 0,15 \text{ Вт/м}^2$ час буде виражений чотиризначним числом років. У той же час наші результати досліджень показують, що величина Δq знаходиться в межах 100 – 150 років, а це підтверджує визначну роль конвективного теплопереносу у дисперсному середовищі [32, 33].

Для утворення конвективних потоків у пористому середовищі необхідна наявність мінімального температурного градієнта [33]. Для умов підземного газогенератора (породи покрівлі приймаємо однорідними, слабо- проникними) при потужності порід покрівлі в 200 м значення температурного градієнта дорівнює $6,5 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ \text{C/м}$. Фактично при СПГВ температурний градієнт складає в середньому $5 \text{ }^\circ \text{C/м}$. Тому в природних умовах СПГВ створює умови для здійснення вільної конвекції у покривних породах. Примусове нагнітання у газогенератор дуття додатково створює вертикальний градієнт тиску, який є основною причиною конвекції у покривних породах. Наприклад, на глибині $H = 200 \text{ м}$ в умовах нині діючої Ангренської станції «Підземгаз» (Узбекистан) температура в природних умовах дорівнює $T = H \cdot r + \tau, \text{ }^\circ \text{C}$, тут $r = 0,03 \text{ }^\circ \text{C/м}$ геотермічний градієнт; $\tau = 15 \text{ }^\circ \text{C}$ – температура земної поверхні). Таким чином, на глибині $H = 200 \text{ м}$ вода, що насичує породу, має температуру $\tau = 21 \text{ }^\circ \text{C}$. Під час нагнітання дуття з тиском $P = 3 \text{ МПа}$ середня швидкість висхідної води, що фільтрується у породі, яка визначена за формулою Дарсі, дорівнює $0,17 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}$. Це в 130 разів перевищує критичну швидкість вертикальної фільтрації ($1,3 \cdot 10^{-10} \text{ м/с}$), за якою необхідно враховувати конвективну складову в процесі теплопереносу.

Враховуючи, що покривні породи і води, які насичують їх, не є нестискними, а коефіцієнт п'єзопровідності має кінцеве значення, то перерозподіл тиску відбувається за визначений час. При цьому він настає швидко в місцях пласта, що найближче розташовані до точки впливу, і повільніше у місцях, найбільш віддалених від неї.

У вертикальному напрямку перерозподіл тиску можна визначити за формулою:

$$\frac{\partial h}{\partial r} = \varphi \cdot \frac{\partial^2 \cdot h}{\partial \cdot r^2}, \quad (7.3)$$

а швидкості

$$v_r = -\psi \cdot \frac{\partial h}{\partial r}, \quad (7.4)$$

де φ – коефіцієнт п'єзопровідності;

ψ – коефіцієнт фільтрації;

h – напір, м.

Процес теплопереносу у покривних породах у вертикальному напрямку з урахуванням конвекції та теплопровідності для однорідного середовища може бути виражений формулою:

$$-\gamma_n \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + v_r \cdot a_s \cdot \rho_s \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = a_n \cdot \rho_n \cdot \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (7.5)$$

де γ , a_n , ρ_n – відповідно коефіцієнт теплопровідності порід, їх щільності та питомої теплоємності;

a_v , ρ_v – щільність і питома теплоємність води, яка насичує породу;

v_r – швидкість висхідної фільтрації води під дією градієнтів тиску і температури.

Сумісні рішення рівнянь (7.3– 7.5) дозволяють визначити час проявів у приповерхневих шарах землі при таких допущеннях: покривні породи однорідні, складені глиною з коефіцієнтом фільтрації $\phi = 1,2 \cdot 10^{-7}$ м/с; напрямок конвективного теплопереносу визначається напрямком швидкості фільтрації води v_r , яка насичує покривні породи; швидкість вихідної фільтрації води v_r у слабопроникних породах набагато більша швидкості горизонтальної фільтрації, значенням якої нехтуємо [26].

Аналіз рівнянь (7.3) – (7.5) показує, що час прояву теплової аномалії знаходиться в оберненій залежності від тиску дуття і в прямій залежності від потужності покривних порід. У той же час для відповідного газогенератора, на якому виконують теплотричні дослідження, потужність покривних порід, їх теплофізичні та гідрогеологічні властивості, а також технологічні параметри процесу практично постійні. Тому задаючись значеннями, можна визначити час прояву теплової аномалії в кожному конкретному випадку.

На рис. 7.13 наведено результати, які одержані при розрахунку рівнянь (7.3) – (7.5) для умов підземного газогенератора. Для порівняння на рисунку зображена крива 2, яка описує розповсюдження теплової аномалії на сіркодобувній ділянці, що відпрацьовується методом підземної виплавки сірки (ПВС) на Язівському родовищі (Львівська обл., Яворівський р-н).

Встановлено, що незважаючи на різницю температур теплоносія у пласті ($1000 - 1200^\circ \text{C}$ – СПГВ, $160 - 170^\circ \text{C}$ – ПВС), за інших рівних умов, ч прояв теплової аномалії під час СПГВ складає 247 р., а при ПВС – 126 р. Цей чинник пояснюється тим, що геотермічні градієнти для вказаних регіонів різні: для Язівського сірчаного родовища – $0,058^\circ \text{C/м}$, для Ангренського кам'яновугільного родовища – $0,03^\circ \text{C/м}$.

Таким чином, за інформацію про зміну ситуації в пласті може бути використана тепла аномалія, яка розповсюджується від джерела в бік денної поверхні та фіксується у приповерхневому шарі за допомогою тепломірів; така інформація може бути одержана на поверхні вже через 4 – 15 діб після початку зміни ситуації у пласті (поява штучного джерела тепла, зміна напрямку і швидкості його руху та ін.); час прояву теплової аномалії у приповерхневому шарі землі в основному визначається тиском, який створюється у пласті під час ведення процесу видобутку. Наведене значення часу прояву теплової аномалії для умов Ангренської станції «Підземгаз» визначає оперативність керування процесом газифікації вугілля, який оснований на теплотрії.

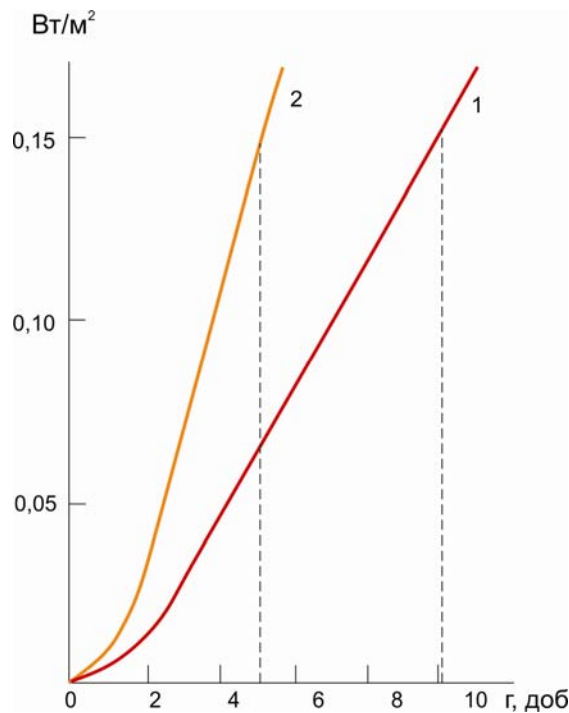


Рис. 7.13. Час прояву максимальної теплової аномалії в період підземної газифікації вугілля на Ангренській станції «Підземгаз» (1) і в процесі видобутку сірки на Язівському родовищі (2)

У процесі газифікації вугільних пластів стінки каналів газифікації поступово вигоряють, що обумовлює пересування зони горіння з деякою швидкістю. За даними роботи [11], швидкість пересування вогневого вибою знаходиться в межах 0,3 – 1 м/добу, а в режимі газифікації при більш низьких значеннях тиску дуття вона ще менша. Тому можна вважати, що одержана величина часу прояву теплової аномалії (оперативність методу) є досить сприятливою для умов газифікації. Враховуючи швидкість посування зони горіння при здійсненні теплотричного методу контролю, з метою визначення місцеположення меж останньої, необхідно прийняти до уваги поправку на оперативність (m), яку визначають за формулою:

$$S = v \cdot \Delta t,$$

де v – швидкість переміщення зони горіння, м;

Δt – оперативність методу.

При відомому напрямку руху зони горіння дійсне місцезнаходження її меж на момент виміру буде на S метрів випереджати місцезнаходження, яке визначено під час випробувань.

Якщо прийняти швидкість посування межі зони горіння в 1 м/добу, то при оперативності $\Delta t = 5$ діб поправка складе усього 5 м, що на практиці є сприятливою величиною. Однак поправку необхідно обов'язково враховувати під час буріння нових технологічних свердловин, особливо якщо буріння в часі відбувається значно пізніше теплотричних вимірів.

Натурні експерименти на станції «Підземгаз» були проведені за мобільною схемою методом послідовної перестановки тепломірів на всій площі газогенератора. Тепломіри (15 шт.) розміщували на глибині 1,1 м на відстані

24 – 28 м один від одного у шаховому порядку. Виміри температури проводили протягом однієї доби, які визначили місцезнаходження зон горіння в каналі газифікації, що утворився між свердловинами 18 н.г. і 20 н.г. (рис. 7.14). Аналіз одержаних результатів показує, що над каналом газифікації спостерігаються підвищені значення теплових потоків, причому залежно від ширини каналу ці значення зростають в напрямку від осі каналу до його меж (у давно експлуатованих широких каналах) і мають максимальне значення (свердловина 22 н.г.) біля осі каналу (в нових вузьких каналах).

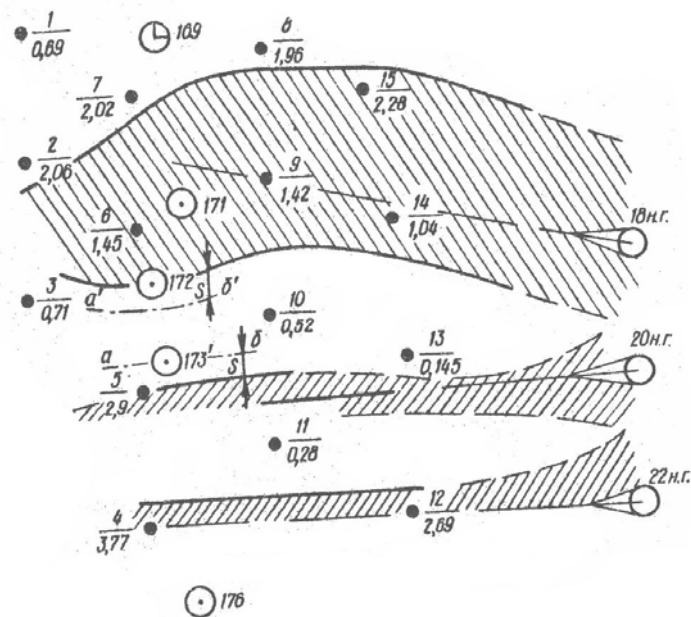


Рис.7.14. Карта розвитку процесу СПГВ у підземному газогенераторі (станом на травень 1987 р.): 1 – похило-горизонтальна дуттьова свердловина; 2 – вертикальна дуттьова свердловина; 3 – місце установлення тепломіра: в чисельнику – порядковий номер; у знаменнику – показання Вт/м²; 4 – контрольна свердловина; 5 – місцезнаходження зони горіння за результатами теплотрії; 6 – приблизне положення межі зони горіння; 7 – положення зони горіння на момент буріння свердловин 172 і 173'; 8 – вигазований простір

Це пояснюється тим, що в давніх діючих каналах бічні стінки, на яких відбувається горіння вугілля, поступово віддаляються від осі каналу. Тому температура у центральній частині каналу з часом знижується, а на стінках підтримується практично постійною.

У нових каналах газифікації процес горіння відбувається практично по усьому периметру або тільки на бічних стінках, які знаходяться досить близько одна від одної, що обумовлює підтримання у центральній частині каналу температури, яка є близькою за величиною до температури на стінках каналу, тому й підвищені тут значення теплових потоків.

Установлено, що за межами діючих каналів газифікації величина теплових потоків значно зменшується і за своїм значенням наближається до значення

природного теплового поля. Це явище підтверджує раніше прийняте допущення про перевагу у слабопроникних породах (за наявності градієнта тиску) вертикальної швидкості фільтрації, а також і конвекції в тому ж напрямку, над горизонтальною швидкістю фільтрації насичених вод [28].

Результати, які були одержані під час виконання теплометричних вимірів на підземному газогенераторі, були враховані при плануванні місць буріння нових технологічних свердловин СПГВ. Однак дві свердловини були пробурені в місцях, де, з урахуванням поправки S , повинна була знаходитись вигазована зона каналів 18 н.г. і 20 н.г. (свердловини 172 і 173'). Буріння показало, що свердловини потрапили в зону порушених гірських порід – результат минулого процесу газифікації. Цей чинник свідчить про достовірність інформації, одержаної за допомогою теплометричного методу контролю.

Застосування теплометричного методу контролю дозволяє використовувати як часткову, так і повну автоматизацію керування технологічним процесом СПГВ. Автоматизована система має декілька функціональних блоків збору інформації від датчиків, її обробки і запису. Показання датчиків фіксуються автоматично через задані проміжки часу.

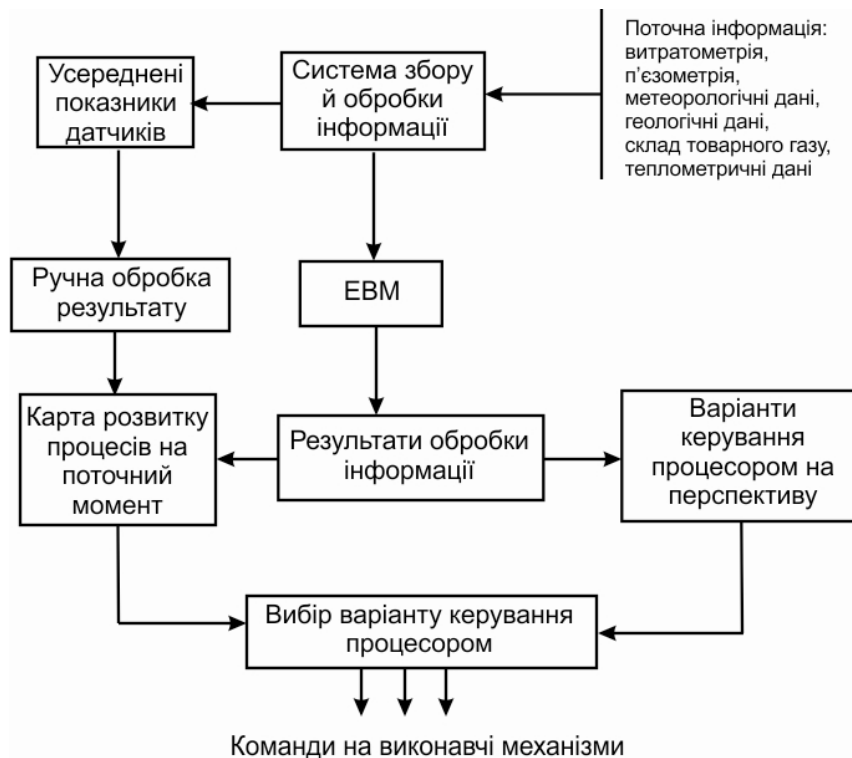


Рис. 7.15. Схема керування процесом СПГВ

Частково автоматизація керування процесом СПГВ може бути застосована, наприклад, за схемою, наведеною на рис. 7.15. На дільниці підземного газогенератора, який експлуатується, й обладнаний нагнітальною і газовідвідною свердловинами, у приповерхневому шарі землі встановлюють датчики – тепломіри. У блок збору інформації надходять дані від тепломірів і датчиків, які визначають водоприток у пласт (гідродинамічні дані); теплотворну здатність генераторного газу (калориметричні дані), хімічний склад газу, витрати дуття й одержаного газу (витратоміри) і їх тиск

(п'єзометричні дані), а також метеорологічні умови довкілля. Після відповідної обробки система видає середньогодинні значення одержаних даних, за якими далі викреслюють карту розвитку процесу на поточний момент часу. Після аналізу ситуації, відображеній на карті, та наявної технологічної, геологічної й економічної інформації визначають найбільш ефективний варіант керування процесом, тобто ті оргтехзаходи, застосування яких підвищує ефективність процесу газифікації.

Повна автоматизація процесу передбачає безпосереднє введення оброблених результатів вимірів після системи збору в ЕОМ. Інформація, яка надійшла, обробляється з урахуванням геологічної, технологічної й економічної ситуації на газогенераторі. Результати розрахунків видаються у вигляді карти розвитку процесу на поточний момент і цифрових записів варіантів керування. Аналіз розрахованих варіантів дозволяє вибрати найбільш ефективний і надати відповідні команди на виконавчі механізми, які керують запірною арматурою свердловин, роботою компресорних установок чи бурових агрегатів.

Промислові випробування теплотметричного методу контролю і керування процесом СПГВ показали, що за його допомогою можна оперативно вирішувати технологічні питання з керування процесом газифікації. Застосування методу не вимагає великих витрат і забезпечує значний економічний ефект. Наприклад, ефект від скорочення кількості покинутих свердловин, виключення буріння контрольних свердловин і впровадження процесу в оптимальному режимі склав на станції «Підземгаз» біля 200 тис. грн/рік. При цьому одержано генераторний газ більш високої теплотворної здатності.

8. Експериментальні дослідження стану гірських порід у термодинамічних умовах

8.1. Фізичний стан речовини

Розрізняють наступні типи агрегатного стану простих тіл: тверде, рідке і газоподібне. Перехід хімічно однорідного (однокомпонентного) простого тіла із одного виду агрегатного стану в інший характеризується фазовою $p - t$ діаграмою (рис. 8.1).

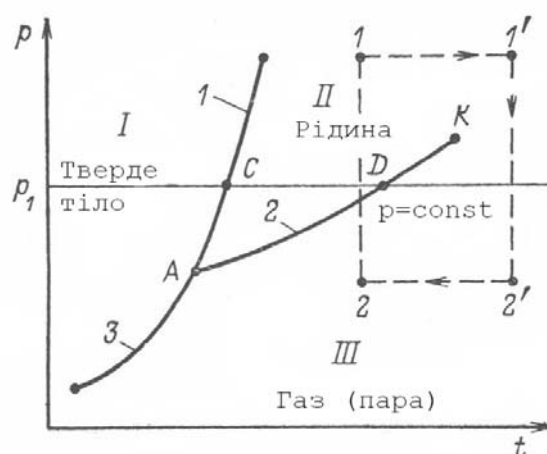


Рис. 8.1. Діаграма фазових станів речовини (однокомпонентна система):
1 – лінія плавлення (твердіння); 2 – лінія випаровування (конденсації); 3 – лінія сублімації (десублімації); А – потрійна точка; К – критична точка

Якщо при постійному тиску нагрівати тіло, наприклад воду, то температура його буде безперервно зростати, поки не досягне деякого значення, що характеризує початок переходу тіла з рідкого стану II у газоподібний III. Цей процес прийнято називати процесом кипіння; зворотний процес перетворення пари III в рідину II, який відбувається з об'ємом тієї ж кількості теплоти, називають процесом конденсації.

Перехід речовини з твердого стану I в рідкий II називається процесом плавлення; зворотний процес – твердінням.

Точку перетину ліній випаровування і плавлення в $t - p$ координатах (див. рис. 8.1) називають потрійною точкою А. В потрійній точці бере початок і лінія сублімації (перехід твердої речовини у газоподібну). Зворотний процес називається десублімацією. Тому в точці А одночасно у рівноважному стані співіснують три види агрегатних станів речовини: твердий, рідкий і газоподібний.

Для води потрійна точка характеризується наступними даними:

$t_A = 0,01^\circ \text{C}$; $p_A = 0,623 \text{ Па}$. Параметри потрійної точки речовини відносять до ряду термодинамічних констант цієї речовини.

Лінії фазових перетворень у координатах тиск-температура визначають термодинамічну рівновагу двох фазових систем. Наприклад, на лінії випаровування чи насичення має місце рівновага пари і рідини (насичена чи волога пара), на лінії плавлення – рівновага рідкої і твердої фаз тощо. Рівняння кожної такої лінії – це рівняння залежності температури від тиску

$$\varphi(p, t) = 0.$$

В інших координатах ці лінії мають інший вигляд, наприклад, лінії кипіння для води у $p - v$ координатах. Тому стан будь-якої двофазної системи речовини у координатах $t - p$ визначається значенням температури t чи тиску p і концентрацією однієї з двох фаз x ; стан у потрійній точці (область A) характеризується вже значеннями концентрацій двох фаз із трьох x_1, x_2 .

Теплота випаровування, плавлення і сублімації – це теплота ізотермічних перетворень, тобто трансформацій, які проходять без змін температури речовини ($t = idem$).

Терміни *idem* і *const* означають: *idem* – змінна величина, яка зберігає в даному процесі незмінне значення; *const* – постійна (у принципі довідкова) величина.

Вищенаведені теплоти називають теплотами фазових перетворень внаслідок рівноважного переходу речовини з однієї фази в іншу. Чисельне значення їх визначається температурою чи тиском, при яких відбувається відповідний процес

$$r = r_1(t) = r_2(t).$$

Зі зростанням тиску теплота кипіння зменшується, і в критичній точці K (кінцева точка лінії кипіння) вона стає рівною нулю. Тут у точці K зникає різниця між рідиною і газом. Параметри критичної точки K : $p_{кр}$ – критичний тиск, при якому і вище якого рідина не може бути трансформована у пару; $t_{кр}$ – критична температура, при якій і вище якої пара не може бути зконденсована (табл. 8.1) [43].

Таблиця 8.1

Критичні параметри деяких речовин

№ п/п	Речовина	Критична температура, $t_{кр}$, °С	Критичний тиск, $P_{кр}$, МПа
1	Азот N ₂	–149,90	33,90
2	Кисень O ₂	–118,40	5,07
3	Метан CH ₄	–82,60	45,70
4	Етан C ₂ H ₆	32,30	48,20
5	Пропан C ₃ H ₈	96,70	42,00
6	Аміак NH ₃	132,30	11,28
7	Вода H ₂ O	374,15	22,13

Із $p - t$ діаграми бачимо, як змінюється стан речовини під час нагрівання, наприклад, при постійному тиску. При переході по ізобарі ($p = idem$) з області твердого стану речовини в область газоподібного стану перетинаються

лінія плавлення у точці C , область рідкого стану Π , лінія насичення AK у точці D . Одночасно на $p - t$ діаграмі, слідкуючи шлях переходу з рідкого стану (точка 1) у газоподібний, шлях $1 - 1' - 2' - 2$ через закритичну область, бачимо, що цей перехід можна зробити шляхом безперервних змін речовини, тобто без фазових енергетичних бар'єрів (у даному випадку лінію насичення по шляху $1 - 2$). Це означає, що між рідиною і газом немає принципових різниць, і для них може бути сформульовано єдине рівняння стану речовини

$$\varphi(p, v, t) = 0.$$

Під час аналізу фазових рівноваг і процесів фазових переходів велику роль грає так зване правило фаз Гіббса. Це правило формується наступним чином:

$$\psi = n - r + 2, \quad (8.1)$$

де ψ – кількість незалежних змінних, які визначають стан термодинамічної системи (чи, як часто говорять, кількість степенів свободи системи);

n – кількість компонентів у системі;

r – кількість фаз у системі.

Рівняння (8.1) дозволяє визначити в умовах рівноваги системи максимальну кількість існуючих фаз. Виходячи з того, що кількість степенів свободи ψ не може бути від'ємною, при $\psi = 0$ максимальна кількість фаз складе $r = n + 2$, тобто рівна кількості компонентів плюс два. Наприклад, вода має один компонент ($n = 1$), який може одночасно знаходитись у трьох фазах: твердій, рідкій, газоподібній (див. рис. 8.1, потрійна точка). Якщо є одна фаза ($r = 1$), то кількість степенів свободи для одного компонента в системі ($n = 1$) дорівнюватиме двом, і тоді незалежними змінними можуть бути температура і тиск, а інші параметри системи (питомий об'єм, ентальпія) визначаються за вихідними змінними p, T .

У випадку якщо є дві фази – рідина і пара ($r = 2$), то кількість незалежних змінних $\psi = 1$ (рівняння (8.1), $n = 1$). Незалежними змінними, які повністю визначають стан кожної фази системи, будуть температура чи тиск. Цей висновок дуже важливий. Наприклад, якщо відома температура фазового перетворення, то вона однозначно визначає всі інші термодинамічні величини – тиск у точці перетворення, щільність речовини у кожній із фаз, тощо.

Із умови рівноваги фаз в однокомпонентній системі можна зробити висновок, що тиск насиченої пари є функція тільки температури і навпаки

$$p = f(t); \quad t = t(p).$$

Це означає, наприклад, що температура кипіння рідини залежить від тиску. З рис. 8.1 бачимо, що лінія сублімації і лінія насичення мають позитивний нахил. Це означає, що зі зростанням тиску температура фазового переходу тут підвищується. Ця залежність справедлива для всіх чистих речовин. Лінія плавлення для різних речовин може мати як позитивний, так і від'ємний нахил.

Коли до індивідуального компонента (наприклад, вугілля, нафта, вуглеводні) додається другий, третій компоненти, тобто вводяться нові змінні, фазовий стан системи значно ускладнюється. Наприклад, для однокомпонентної системи крива тиску насичення пари на графіку тиск – температура (див. рис. 8.1) є одночасно кривою точок початку кипіння і кривою точок роси (конденсації). Для бінарних чи багатокомпонентних систем криві точок початку кипіння і точок роси не співпадають. Ці криві для багатокомпонентних систем утворюють складну фазову діаграму, притому для кожного складу вона своя [30].

Для вуглеводневих систем, які складені з великої кількості компонентів, що особливо характерно для газоконденсатних родовищ, вигляд фазових діаграм залежить насамперед від складу суміші і властивостей індивідуальних компонентів.

Фазова діаграма такої багатокомпонентної суміші наведена на рис. 8.2. Крива точок початку кипіння і крива точок роси сходяться у критичній точці ($p_{кр}$, $t_{кр}$). Крива точок кипіння відповідає 100 % - му складу рідини у системі (за об'ємом), а крива точок роси – 100% - му складу газу (за об'ємом). Двофазна область на діаграмі (рис. 8.2) обмежена кривими точок початку кипіння і точок роси, всередині якої газ і рідина знаходяться у стані рівноваги.

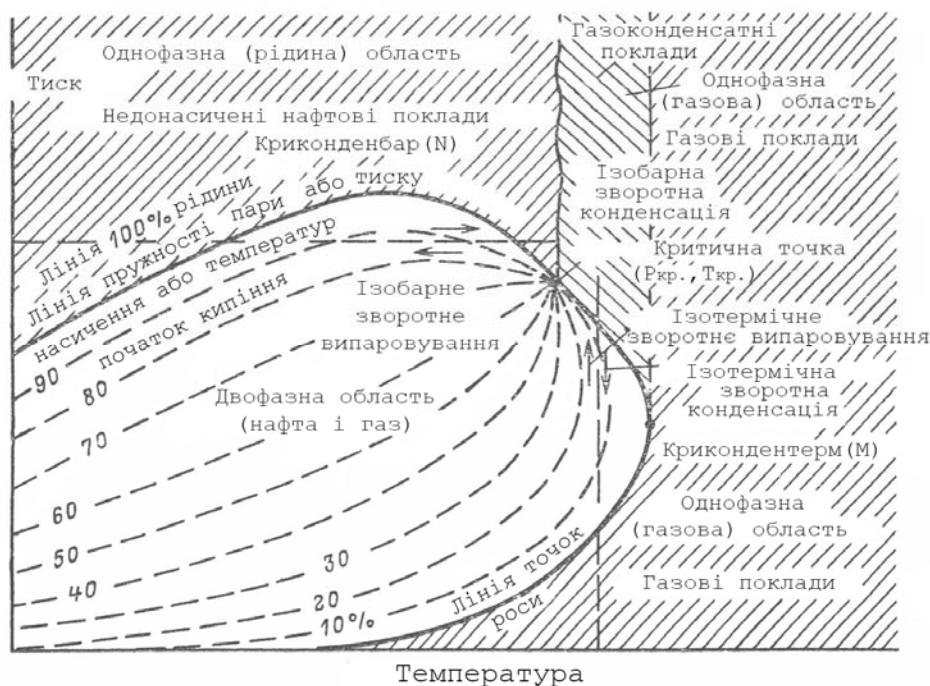


Рис. 8.2. Фазові співвідношення і можливі типи вугільних, нафтових і газових покладів зі складними вуглеводними системами

Поняття “крикондентерм” (точка M) означає найвищу температуру, при якій рідина і газ можуть існувати у рівновазі, поняття “криконденбар” означає найбільший тиск, при якому рідина і газ можуть співіснувати у рівновазі.

Поблизу критичної точки між криконденбаром і крикондентермом знаходяться “ретроградні області”, в межах яких конденсація чи пароутворення

відбувається у напрямку, зворотному звичайним фазовим змінам. Наприклад, ізотермічна зворотна конденсація означає, що рідина конденсується при зниженні тиску під час постійної температури, а ізобарна зворотна конденсація означає конденсацію рідини при постійному тиску під час зростання температури. За аналогією відбувається зворотне ізотермічне й ізобарне випаровування. Діаграми фазових співвідношень зі складними багатокомпонентними системами дозволяють визначати раціональні шляхи розробки вугільних, нафтових і газових родовищ.

8.2. Поведінка покрівлі та підшви вугільного пласта в термодинамічних умовах

У процесі газифікації вугільних пластів бічні породи вугільного пласта, як відомо, виконують функцію стінок корпусу підземного газогенератора.

Однак сам процес газифікації може бути порушений обвалом порід покрівлі у каналі газифікації, внаслідок чого в особливо несприятливих умовах може настати припинення горіння.

Завал вогневого простору, як правило, не має повсюдного характеру і може бути усунутий тривалою продувкою повітрям або з додаванням до нього кисню під великим тиском.

Звичайно підземна газифікація вугілля відбувається при температурі 1000 – 2000° С. Породи починають плавитись вже при температурі 1200° С (легкоплавкі глинясті сланці та глини) і вище. Точка пом'якшення і плавлення порід залежить від хімічного складу гірської породи, яка досліджується.

Очевидно, що за відсутності своєчасного обвалення порід покрівлі одразу ж за посуванням вогневого вибою переріз каналу газифікації поступово буде зростати, що від'ємне вплине на процес. З іншого боку, обвалення порід покрівлі безпосередньо біля лінії вогневого вибою може бути причиною скорочення подачі дуття, і це також несприятливо вплине на хід процесу.

Для найбільш повного керування процесом газифікації необхідно всебічно вивчити вплив поведінки бічних порід на канал газифікації і на цій основі комбінувати умови, які забезпечать найкращі для газифікації розміри поперечного перерізу.

Для виявлення поведінки бічних порід навколо вогневого вибою авторами були проведені експериментальні роботи з термодинамічних досліджень оточуючих вогневий простір порід. Експерименти були проведені в термічній лабораторії (цеху) Дніпропетровської національної металургійної академії в 1986 – 1993 рр. і ніде до цього часу не публікувались. Зразки породи відбирались на шахтах Львівсько-Волинського і Західно-Донбаського басейнів.

8.3. Температурні дослідження стану порід покрівлі вугільного пласта n_7^H “Сокальський”

Порода безпосередньої покрівлі пласта n_7^H “Сокальський” являє собою глинястий сланець темно-сірого кольору. Порода легко розшаровується за площинами напластування. Площини розшарування – гладкі, матові. Легко розтріскуються під час висихання на повітрі. Порода покрівлі пласта n_7^H складена з таких хімічних елементів: SiO_2 – 50,65 %; $Al_2O_3 + TiO_2$ – 27,35 %; Fe_2O_3 – 6,42 %; CaO – 0,72 %; MgO – 2,35 %; вологість (W) – 1,49 %; втрати під час термічного нагрівання – 11,02 %.

Для експерименту підготовлено зразок № 1 породи покрівлі пласта n_7^H розмірами $630 \times 560 \times 160$ мм. Він був випробуваний у газовій камерній пічці. Його розмістили і закріпили на двох опорах з обох боків, одночасно він є частиною склепіння камерної печі (рис. 8.3).

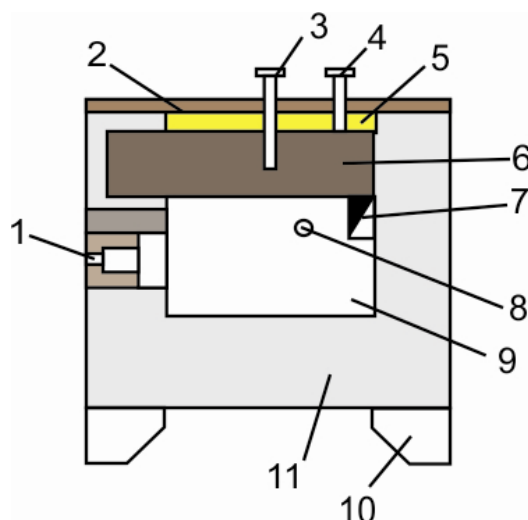


Рис. 8.3. Схема термічного випробування зразка № 1 породи покрівлі вугільного пласта n_7^H “Сокальський”: 1 – газовий пальник; 2 – кришка печі;

3 – температурний датчик № 1; 4 – температурний датчик № 2;
5 – засипка з піску; 6 – зразок породи покрівлі пласта; 7 – димохід;
8 – температурний датчик № 3; 9 – камера печі; 10 – опори печі;
11 – корпус газової камерної печі

Газова камерна піч – це агрегат, в якому в процесі горіння газоподібного палива, яка подається через пальник 1, у камері 9 виділяється теплота, яка використовується для підігрівання зразка 6. Відходи згоряння видаляються з камери через димохід 7.

Підігрів зразка виконується знизу, що наближує умови випробування до природних умов, які мають місце при газифікації вугільних пластів.

Під час випробувань замірювалась температура у наступних місцях. Температурний датчик (термопара) № 1 розміщено у товщі зразка, приблизно на глибині 90 – 100 мм. Термопара 4 (датчик № 2) розміщено на зовнішній

поверхні зразка 6, який засипаний піском 5. Третя температурна точка (датчик № 3) розташована всередині газової камери 8, поблизу нижньої поверхні зразка, який випробовується. Зверху піч покривалась металевою кришкою 2. Піч розташована на опорах 10.

Випробування відбувалось у газовому полум'ї. До 800°C зростання температури відбувалось зі швидкістю 10° С за хвилину. Після 800°C температура зростала зі швидкістю 5 – 6° С за хвилину. Заміри температури до 1300° С проводили платино-платинородієвими термопарами, а вище 1300°C – оптичним пірометром через отвори у корпусі печі.

Спостереження під час випробувань показали наступне. В інтервалі температур 210 – 620°C почалось відскакування з легким потріскуванням дрібних лусочок сланцю, яке пов'язане з вмістом гігроскопічної вологи.

Найбільш інтенсивний прояв тріщин спостерігався в інтервалі температур 500 – 600°C. При 1050°C почалось випинання більш нагрітих частин. Випинання можна пояснити, мабуть, наявністю окислів кальцію чи магнію. Починаючи з 1200° С відмічено провисання зразка, яке вказує на початок розм'якшення породи, при 1220 – 1340° С відбувається все зростаюче оплавлення нижньої поверхні зразка.

Зменшення товщини зразка внаслідок оплавлення і стікання матеріалу породи склало в середній частині зразка біля 60 мм і одержало пористу структуру. Пори неоднакового розміру. Колір цього шару – коричнювато-сірий. Вище за ним будова сланцю залишилась незмінною, зросла тріщинуватість, колір з темно-сірого місцями перейшов в червонувато-сірий. Пориста структура, необхідно розуміти, утворилась у результаті виділення газів, під час хімічної взаємодії компонентів розплавленої маси.

Криві замірів температур у трьох точках наведено на рис. 8.4.

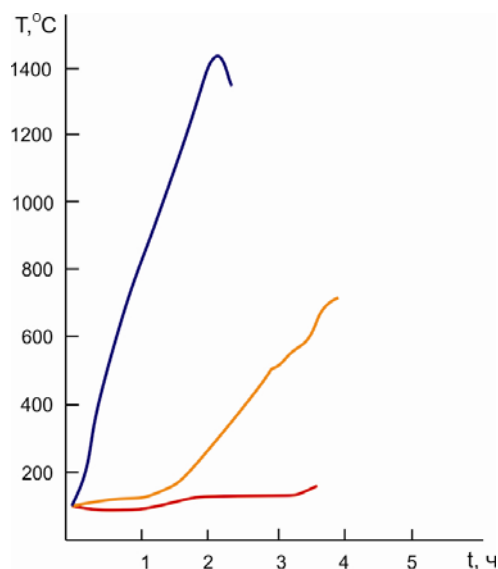


Рис. 8.4. Графіки температурних кривих випробувань породного зразка № 1:
1 – для температурного датчика № 1; 2 – для температурного датчика № 2;
3 – для температурного датчика № 3

З графіків (рис. 8.4) випливає, що на кривій, яка характеризує точку 1, видно зупинки (505, 528, 682° С), за якими можна припустити про зміни хіміко-мінералогічного складу порід у цих температурних інтервалах.

Необхідно відзначити, що часткове зростання температурних кривих 1, 3 відбувається завдяки зменшенню товщини породного зразка, яка відокремлює ці точки від безпосереднього стикання з відкритим полум'ям.

З кривої 3 бачимо, що при температурі 1400° С повністю розм'якшений зразок зруйнувався і впав.

Спостереження за зразком № 2, який було закріплено консольно одним боком у кладці печі і вільно завислим з другого боку і також проводились у газовій камерній печі (рис. 8.5). За структурою матеріал зразка № 2 не відрізняється від зразка № 1.

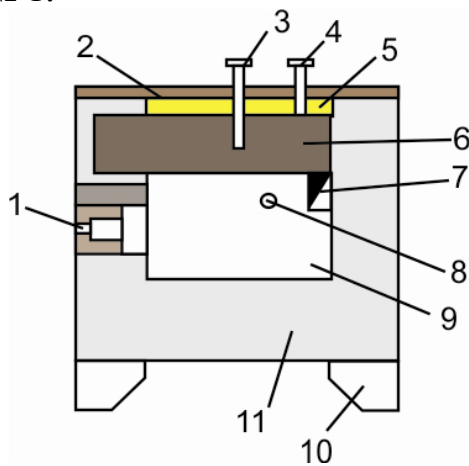


Рис. 8.5. Схема термічного випробування зразка № 2 породи покрівлі вугільного пласта n_7 "Сокальський": 1 – газовий пальник; 2 – кришка печі; 3 – температурний датчик № 1; 4 – температурний датчик № 2; 5 – піщана засипка; 6 – зразок породи покрівлі; 7 – димохід; 8 – температурний датчик № 3; 9 – камера печі; 10 – опори печі; 11 – газова камерна піч

Графік температурних кривих випробування зразка № 2 наведено на рис. 8.6.

Крива 1 показує температурні зміни у товщі породного зразка (температурна точка № 1), крива 2 – у верхній поверхні породного зразка на межі шару піску (температурна точка № 2); крива 3 – всередині простору газової камери у безпосередній близькості до нижньої поверхні зразка.

У процесі проведення експерименту спостерігались такі термічні зміни. В інтервалі температур 390 – 820° С спостерігались потріскування і відскакування лусочок сланцю. При температурі 1310 – 1420° С відбувається оплавлення нижньої поверхні зразка. Під дією високої температури порода завислого кінця зразка розшаровується. Шари породи, розм'якшуючись і оплавляючись, звисають донизу, все більше розіходячись у напрямку до змішаного кінця породного зразка.

Крива 3 (див. рис. 8.6) показує, що температура у товщі зразка досягла 1420° С, потім поступово почала знижуватись. Це, мабуть, пов'язано з тим, що звисаюча консоль зразка перекрила доступ полум'я до термопар 8 (див. рис. 8.5).

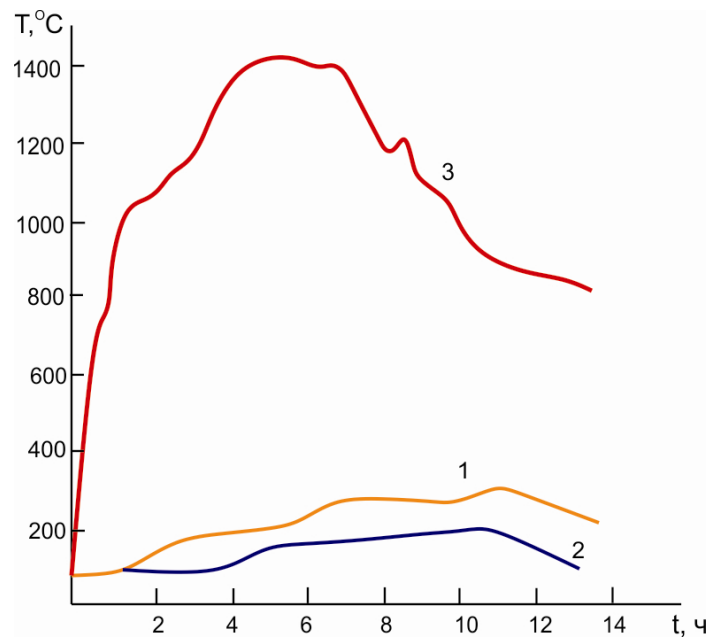


Рис. 8.6. Графіки температурних кривих випробування породного зразка № 2:
1 – для температурного датчика № 1; 2 – для температурного датчика № 2;
3 – для температурного датчика № 3

Визначались і міцнісні властивості зразків порід покрівлі, під якими розуміють здатність порід створити опір руйнуванню під дією прикладених механічних і термічних напружень [39].

Величину межі міцності породи при одновісному стисканні визначали за формулою

$$\sigma_{ст} = \frac{P}{F}, \text{ кг с/см}^2 = 0,981 \cdot 10^5 \frac{P}{F}, \text{ Па},$$

де P – руйнівальне навантаження, кг;

F – площа поперечного перерізу зразка, см^2 .

Породний зразок був випробуваний на тимчасовий опір стиску до і після термічних випробувань (табл. 8.2).

Таблица 8.2

Результати випробувань зразків на стиск

Стан породи покрівлі	Тимчасовий опір стисканню, Па	
	перпендикулярно напластуванню	паралельно напластуванню
До випробування (природна)	$23,5 \cdot 10^5 - 44,14 \cdot 10^5$	$14,7 \cdot 10^5 - 34,3 \cdot 10^5$
Після випробування (метаморфізована)	$12,26 \cdot 10^5 - 11,7 \cdot 10^5$	$10,8 \cdot 10^5 - 39,24 \cdot 10^5$

Дані табл. 8.2 підтверджують те, що тимчасовий опір стисканню зразків порід коливається у значних межах. Під дією стисної сили у перпендикулярному напрямку напластуванню тимчасовий опір знижується на 44 – 66 %, а при паралельній дії цієї сили напластуванню тимчасовий опір

стискові змінюється незначно. Тимчасовий опір на сколювання при метаморфізації, навпаки, зростає на 9 – 11 %.

Міцнісні властивості зразків породи покрівлі вугільного пласта n_7^H “Сокальський” випробовувались також спеціальним приладом, за допомогою якого були визначені деформації під навантаженням і впливом високої температури у газовій камерній печі.

Цей прилад складається з електричної криптолової печі стандартного розміру і механічного пристрою, який створює навантаження на зразок, з реєстрацією зміни розміру породного зразка за висотою упродовж періоду випробувань. Експеримент відбувався в умовах дії на випробуваний зразок, навантаження і поступового зростання температури. Розміри зразка прийняті у відповідності з нормами [31]: довжина 50 мм, діаметр – 42 мм.

Породний зразок розміщувався у зоні найбільшого нагрівання камерної печі на вугільній прокладці розмірами 50×100 мм, яка розміщена на вугільній опорі таких же розмірів. Зверху зразок також накривали такою ж вугільною прокладкою, через які навантаження передавались на породний зразок.

Експеримент відбувався у відновному полум’ї камерної печі.

У процесі випробування зростання температури до 850° С виконувався зі швидкістю 9 – 10° за хвилину, пізніше швидкість зросла до 5 – 6°С. Заміри температури зразка до 1300°С відбувались платино-платинородієвими термopарами, а далі – оптичним пірометром.

Під час експериментальних досліджень вимірювалась довжина зразка з одночасною фіксацією температури.

У період розм’якшування зразка його довжина зменшувалась на 0,35 мм від розміру довжини, яка досягається зразком при його максимальному видовженні під дією високої температури. Зміни довжини зразка фіксувались на шкалі, яка розміщувалась всередині приладу.

Далі замір відбувався при досягненні 10 % деформації, коли довжина зразка скоротилася на 5 мм, рахуючи від його довжини при максимальному розширенні.

Останній замір проведено при 40% деформації, коли довжина зразка скоротилася на 20 мм, рахуючи від його довжини в період максимального розширення. Ці розміри прийняті нами кінцевими, тобто була досягнута максимальна температура – зразок розм’як повністю і деформації більше не відбувались.

Результати експериментів наведено в табл. 8.3.

Із табл. 8.3 випливає, що початок деформації при стисканні зразків паралельно напластуванню відбувається при трохи більшій температурі, ніж початок деформації при стисканні зразків перпендикулярно площинам напластування.

Таблиця 8.3

Результати досліджень зразків породи покрівлі пласта

 n_7^H “Сокальський”

№ зразка	Щільність породи, г/см ³		Вологість породи, %	Температура початку деформації, ° С	Температура при 10 % стисканні зразка, ° С	Температура при 40 % стисканні зразка (кінець деформації), ° С	Температура плавлення зразка, ° С
	до випробування	після випробування					
Стискання зразка (4,9 · 10 ⁵ Па) перпендикулярно площинам напластування							
1	2,19	1,32	3,50	864	1135	1206	1550
2	2,21	1,38	1,55	863	1085	1090	1575
Стискання зразка (4,9 · 10 ⁵ Па) паралельно площинам напластування							
3	2,39	1,25	6,80	945	1100	1120*	1510
4	2,41	1,22	6,40	935	1120	1130*	1520
*) При досягненні цих температур частина породи зразків розпалась за нашаруваннями							

Температурний інтервал між початком деформації і моментом наближення 10 % стискання (який умовно прийнято нами за початок проявів пластичності зразка) – 155 – 271° С. А повне руйнування зразка (кінець деформації) відбувається при зростанні температури на 175 – 342°С вище тієї, при якій почалась деформація.

Під час проведення експериментів спостерігались деякі види руйнувань зразків. До них відносяться: розшарування, розтріскування, ковзання вздовж площин напластування, виплавлення деяких компонентів порід, утворення пористої маси, яка витікає. Колір шарів породи спостерігався в основному коричнювато-червоний з різними відтінками. Щільність метаморфізованої породи на 30 – 45 % менша вихідної породи. Розплавлена маса має темно-коричневий колір, мабуть, від окислів заліза. Будова породи, яка витекла – пориста, опір стисненню (роздавлюванню) значно слабше, ніж опір незруйнованих шарів породи зразків.

8.4. Температурні випробування стану порід покрівлі вугільного пласта n_8^H Волинського родовища

Порода покрівлі пласта n_8^6 – глинястий сланець темно-сірого кольору. Хімічний склад породи: SiO_2 – 42 %; $Al_2O_3 + TiO_2$ – 21,44 %; CaO – 1,31 %; MgO – 1,45 %; W = 1,31 %, втрати при прокалюванні – 27,34 %. Зберігання на повітрі у сухому місці упродовж декількох годин призводить глинястий сланець до розтріскування і руйнування. Легко розшаровується по площинах напластування і розколюється перпендикулярно площинам напластування.

Експериментальні дослідження зразка породи покрівлі пласта n_8^6 проведені за аналогією з попередніми дослідженнями, наведеними в розділі 8.3. Зразок породи № 3 з розмірами 630×600×160 мм було розміщено у газовій камерній печі за аналогією зі зразком № 2 (рис. 8.5). Зверху через пісок на зразок передавалось рівномірно-розподільне навантаження $0,1 \cdot 10^{-3}$ Па.

Заміри температури проводились у таких місцях:

- безпосередньо на верхній площині зразка, засипаного піском (температурний датчик № 2, див. рис. 8.5);
- у товщі зразка на відстані 65 мм від верхньої поверхні (температурний датчик № 1);
- у товщі зразка, на відстані 110 мм від верхньої його поверхні (температурний датчик № 4);
- у просторі газової камери поблизу нижньої поверхні породного зразка (температурний датчик № 3).

Під час проведення експерименту спостерігались наступні термічні зміни. В інтервалі температур 110 – 890° С відбувались відскакування лусочок сланцю з одночасним потріскуванням; при 1190° С почалось оплавлення нижньої поверхні зразка; при 1215° С – вже вся поверхня оплавилась; у деяких місцях утворились оплавлені бурульки (сталактити), по яких розплавлена порода стікала донизу.

Зростаюче оплавлення нижньої поверхні зразка і стікання розплавленої маси продовжувалось до температури 1410° С (максимально досягнута температура).

Графіки температурних кривих упродовж усього експерименту мали приблизно такий же вигляд, що й на рис. 8.4.

При вивченні зразка після остигання встановлено, що будова породи має характерні особливості, нижня поверхня, що повернена до вогневого простору, покрита сталактитами розплавленої маси зеленувато-жовтого кольору з металічним блиском. На блискаючій поверхні є пори різної величини. На перерізі розлому зразка чітко проглядається пориста структура оплавленої поверхні зразка. Межа між основною частиною зразка і розплавленою зоною різко виражена. Основна частина зберегла звичайну для породи покрівлі пласта n_8^6 будову і характеризується лише більшою твердістю і тріщинуватою будовою.

Міцнісні властивості зразка мають наступні особливості. Тимчасовий опір породи покрівлі пласта n_8^6 стисканню, що знаходився у межах $15,7 \cdot 10^5$ – $34,3 \cdot 10^5$ Па для вихідної породи, знижується залежно від ступеня метаморфізму і досягає $0,2 \cdot 10^5$ – $0,5 \cdot 10^5$ Па.

8.5. Температурні випробування стану породи покрівлі вугільного пласта n_7 Волинського родовища

Хімічний склад породи наступний: SiO_2 – 56,2 %; $Al_2O_3 + TiO_2$ – 26,19 %; Fe_2O_3 – 4,64 %; CaO – 0,75 %; MgO – 3,02 %; W – 1,92 %; втрати під час прокалювання – 7,28 %.

Порода покрівлі – глинястий сланець. Відрізняється від описаних вище порід покрівлі пласта n_8^a меншою схильністю до розтріскування і розшарування на повітрі. Порода має ясно виражену сланцюватість; колір темно-сірий, площини розшарування гладкі, матові, спостерігаються залишки фауни.

Породний зразок № 3 розмірами 600×300×100 мм був розміщений у камері газової рекупераційної печі. Під дією температури спостерігались наступні термічні зміни. В інтервалі температур 420 – 460° С з'явились горизонтально направлені тріщини, від нижньої поверхні зразка відскакували тонкі лусочки до 1 мм площею до 2 – 4 см². При температурі 450 – 530° С з'явилось розтріскування зразка і зросла тріщинуватість в горизонтальному напрямку: це явище, мабуть, пов'язане з видаленням кристалізаційної води з матеріалу зразка. При температурі 1170° С з'явилось помітне оплавлення нижньої поверхні зразка й утворився прогин його в середній частині на 2 – 3 см; при температурі 1250° С – повне оплавлення нижньої поверхні зразка, а прогин у середній частині досяг 4 – 5 см.

При температурі 1400 – 1420° С зразок знаходився на тригодинній витримці – відбувалось тільки оплавлення його поверхні. При досягненні температури 1470° С зразок обвалився під дією гравітаційних сил.

Візуальний огляд метаморфізованої породи зразка показав, що вона має темно-сірий колір з металічним блиском і яскраво вираженою сланцюватістю, колір її – коричнювато-червоний від окислів заліза.

Під час спостереження метаморфізованої породи під мікроскопом виразно проглядається переродження матеріалу породи. Порода стала чорною, непрозорою, вимальовується сланцюватість на значно збільшеній кількості подовжених ділянок, які розташовуються в одному напрямку. Подовжені ділянки – світлі й складені частково з стеблистої маси, частково з згущених мулітових голок. Виразно проглядається пористість зразка.

Проведені міцнісні випробування зразків породи покрівлі пласта n_7 у приладі для вивчення деформації під навантаженням при високих температурах (табл. 8.4).

Дані табл. 8.4 свідчать, що початок деформації при 10 % стисканні і кінець деформації при 40 % стисканні знаходяться приблизно в тих же температурних інтервалах, що й у порід покрівлі вугільного пласта n_7^h “Сокальський”. Збільшення навантаження на зразок з $0,98 \cdot 10^5$ до $4,9 \cdot 10^5$ Па не впливає на температуру початку деформації (розм'якшення), але пришвидшує настання кінця деформації.

Під час випробувань відбулось зменшення об'ємної маси (щільності) на 50 – 57 %.

На зразках спостерігаються наступні подоби деформації: розшарування, ковзання уздовж напластування, розтріскування, розплавлення деяких складових породи, які при витіканні утворюють темно-коричневу пористу з полегшеною вагою масу, яка легко роздавлюється пальцями. Шари метаморфізованої породи між тріщинами напластування досить добре спеклись, одержали достатнє випалювання і значний механічний опір (15 – 40 МПа) роздавленню.

Таблиця 8.4

Результати випробувань зразків породи покрівлі пласта

n_8^6 Волинського родовища

№ зразка	Щільність породи, г/см ³		Вологість породи, %	Температура початку деформації, °С	Температура при 10 % стисканні зразка, °С	Температура при 40 % стисканні зразка (кінець деформації), °С	Температура плавлення зразка, °С
	до випробування	після випробування					
Стискання зразка під навантаженням $0,98 \cdot 10^5$ Па							
1	2,30	1,00	5,2	865	1030	1060	1475
2	2,36	0,99	3,6	930	1015	1035	1480
3	2,35	1,10	3,0	950	1140	1200	1520
Стискання зразка під навантаженням $4,9 \cdot 10^5$ Па							
4	2,32	1,07	3,4	830	1045	1050	1470
5	2,35	0,98	5,5	940	1065	1070	1480
6	2,31	1,14	3,6	890	1020	1040	1485

Метаморфізована порода має в основному темно-коричневий колір, у деяких місцях – коричнево-червоний з матовим відтінком.

Зразок породи № 4 підосви пласта n_8^6 Волинського родовища розмірами 300×300×150 мм було випробувано також і в газовій камерній печі. Його розмістили у нижній частині камери на двох опорах. Зразок підігрівали зверху. Температурні датчики розміщені приблизно також, як і в зразку № 3.

Спостереження показали, що при 610° С у зразку з'явилися тріщини, розташовані паралельно площинах напластування. При температурі 1220° С почалось випинання й енергійне розтріскування по площинах напластування, а при досягненні температури 1290 – 1310° С і розм'якшення.

Характер і структура метаморфізованої породи зразків приблизно співпадає з описаним характером і структурою попереднього зразка № 3.

Тимчасовий опір стисканню зменшився на 20 – 25 % порівняно з вихідним зразком ($15,7 \cdot 10^5$ – $34,3 \cdot 10^5$ Па), що, мабуть, пов'язано з явищем розтріскування.

8.6. Температурні випробування стану породи покрівлі Семенівсько-олександрійського родовища Дніпровського буровугільного басейну

Підготовлені зразки № 5 породи покрівлі являють собою щільну сланцеву глину голулубувато-сірого кольору.

Хімічний склад породи: SiO_2 – 49,33 %; $Al_2O_3 + TiO_2$ – 35,14 %; Fe_2O_3 – 1,21 %; CaO – 0,30 %; MgO – 0,25 %; вологість W – 1,58 %; втрати під час нагрівання – 12,24 %.

Результати експериментальних досліджень міцнісних властивостей породних зразків № 5 під дією високої температури у приладі для вивчення деформації наведено в табл. 8.5.

Таблиця 8.5

Результати випробувань зразків породи покрівлі пласта Б₁
Семенівсько-Олександрійського родовища

№ зразка	Щільність породи, г/см ³		Вологість породи, %	Температура початку деформації, ° С	Температура при 10 % стисканні зразка, ° С	Температура при 40 % стисканні зразка (кінець деформації), ° С	Температура плавлення зразка, ° С
	до випробування	після випробування					
Стискання зразка під навантаженням $0,98 \cdot 10^5$ Па перпендикулярно площинам напластування							
1	1,81	1,54	3,3	770	1410	1475	1710
2	1,78	1,51	3,7	810	1441	1491	1734
3	1,83	1,50	3,4	790	1432	1525	1730
Стискання зразка під навантаженням $4,9 \cdot 10^5$ Па паралельно площинам напластування							
4	1,87	1,92	3,0	815	1212	1520	1723
5	1,82	1,94	3,4	833	1236	1502	1737
6	1,88	1,97	3,3	801	1225	1513	1719

Результати досліджень міцнісних властивостей порід (див. табл. 8.5), також як і при випробуваннях порід покрівлі вугільних пластів n_7^H і n_8^6 , показують, що початок деформації при стисканні зразків паралельно напластуванню трохи відстає у порівнянні з стисканням зразків перпендикулярно напластуванням.

Зі зростанням навантаження на зразки збільшується також і об'ємна маса порід. Одночасно міцнісні властивості значно зменшуються зі зростанням навантаження. А температура плавлення порід зразків значно вища, ніж глинястих сланців, що випробовувались раніше.

Низькі температури (770 – 830° С) початку деформації зразків обумовлені, мабуть, не початком розм'якшення порід, а усадкою, яка залежить як від початку спікання, так і від перекристалізації деяких компонентів породи.

Були також проведені дослідження зразків № 5 у газовій камерній печі. Вони розташувались у печі вільно на двох опорах.

Тріщини розшарування почали з'являтися в інтервалі температур 650 – 810° С. При досягненні температури близько 1240 – 1270° С почали з'являтися місцеві випинання поверхні зразків, пов'язані, можливо, з розплавленням і витіканням заліза.

При температурі 1380° С почалось розм'якшення нижньої поверхні, чітко став відслідковуватись прогин зразка. Метаморфізована порода зразка розшарована в основному тріщинами, напрямком яких співпадає з площинами напластування і частково перпендикулярними напластуванню.

Результати зміни міцнісних властивостей породи зразка наведено в табл. 8.6.

З табл. 8.6 бачимо, що тимчасовий опір стисканню зростає при напрямку стискання перпендикулярно напластуванню на 70 – 80 %, а при стисканні паралельно напластуванню – на 300 – 600 %.

Таблиця 8.6

Результати випробувань зразків на стиск

Стан породи покрівлі	Тимчасовий опір стисканню, Па	
	перпендикулярно напластуванню	паралельно напластуванню
До випробування (природний)	$7,8 \cdot 10^5 - 17,6 \cdot 10^5$	$4,9 \cdot 10^5 - 9,8 \cdot 10^5$
Після випробування (метаморфізований)	$19,6 \cdot 10^5 - 22,0 \cdot 10^5$	$29,4 \cdot 10^5 - 31,3 \cdot 10^5$

8.7. Температурні дослідження стану породи покрівлі вугільного пласта С₆ Західнодонбаського родовища

Над вугільним пластом С₆ залягає порода у вигляді щільного вапняку темно-сірого кольору. У зламі має дрібно зернисту структуру. Міцнісні властивості його досить високі, тому пластові виробки проводяться без підривання покрівлі.

Хімічний склад породи: SiO_2 – 20,10 %; $Al_2O_3 + TiO_2$ – 8,14 %; Fe_2O_3 – 6,60 %; CaO – 21,70 %; MgO – 7,01 %; вологість W – 0,37 %; втрати під час нагрівання – 36,10 %.

Для випробувань були підготовлені зразки № 6 з розмірами 630×420×60 мм. Зразок розміщували в газовій камері на двох опорах, обидва кінця були щільно закріплені у печі. Зверху засипали шар піску, який передавав на зразок рівномірно-розподілене навантаження, яке складало біля $0,15 \cdot 10^5$ Па.

За період термічних випробувань були одержані наступні структурні зміни породи зразка. При досягненні температури 1100° С почалось посилене розтріскування нижньої поверхні зразка. Прогин зразка розпочався при температурі 1290° С, а при температурі 1330° С амплітуда прогину у середній частині склала 25 мм. При досягненні температури 1360° С прогин склав 55 мм, значно зросло тріщиноутворення на нижній поверхні, почалось розшарування, досягаючи місцями 15 – 20 мм. При температурі 1410° С зразок упав. Товщина плити після випробувань зменшилась у середньому на 23 – 26 мм внаслідок

перетворення нижньої поверхні у білий порошок, тобто відбулось випалювання вапняку з утворенням окису кальцію (CaO). Цей процес, як зазначено вище, супроводжувався утворенням тріщин і зниженням міцнісних властивостей породи.

8.8. Температурні дослідження стану порід покрівлі вугільного пласта C_5 Західнодонбаського родовища

Порода покрівлі пласта C_5 вміщує глинястий сланець досить щільної текстури з добре вираженими шарами напластування темно-сірого кольору.

Хімічний склад породи зразка: SiO_2 – 62,04 %; $Al_2O_3 + TiO_2$ – 24,31 %; Fe_2O_3 – 3,68 %; CaO – 0,92 %; MgO – 3,07 %; вологість W – 1,13 %; втрати під час нагрівання – 4,93 %.

Зразок породи № 7 з розмірами 630×450×170 мм був розміщений у газовій камерній печі. Зразок був кріплений однією стороною у кладку з вогнетривкої цегли. Другий кінець плити (консоль) не був закріплений і вільно звисав.

Консоль була завантажена шамотною глиною, яка зверху покладена на шар вогнетривкої глини.

Температура замірювалась аналогічно з зразком № 2.

Графіки температурних кривих випробування породного зразка № 7 приблизно такі ж як і на рис. 8.4. Були відмічені температурні зупинки в інтервалах температур 410 – 420 і 950 – 1040° С.

У процесі температурних випробувань установлено наступні зміни структури зразка.

При досягненні температури 990 – 1130° С утворились тріщини на нижній поверхні, зросло підскакування невеликих лусок породи, з'явилися ознаки випинання в окремих місцях. Тріщини утворювались у різних напрямках і не так як у попередніх випробуваннях з глинястим сланцем, де тріщиноутворення відбувалось паралельно площинам напластування.

При температурі 1140 – 1160° С консоль плити почала примітно опускатися (провисати) і склала біля 110 мм. А при температурі 1190° С амплітуда прогину вже досягнула 230 мм. Одночасно при цій температурі відмічено інтенсивне випинання і плавлення породи зразка.

У порівнянні з раніше проведеними температурними випробуваннями глинястих сланців у цьому експерименті розплавлялась не тільки поверхня зразка, а відбувалось плавлення і взаємодія розплавлених компонентів на значну глибину. При досягненні температури 1320° С плита зруйнувалась (впала).

Під час візуального огляду нижня поверхня зразка має червоний колір від окислів заліза і покрита тріщинами та раковинами. Деякі з раковин доволі глибоко проникають у масив породи зразка. В окремих місцях поверхні утворився пористий пемзоподібний шар червоно-сірого окрасу. Розплавлена маса, що витікла, має червоний колір і досить високу міцність (15 – 40 МПа) у холодному стані.

8.9. Теоретичні узагальнення експериментальних даних поведінки бічних порід у термодинамічних процесах газифікації вугілля

Вивчаючи питання підземної газифікації вугілля, необхідно звернути серйозну увагу на поведінки порід покрівлі та підосви вугільних пластів. Під час розгляду порід покрівлі, як і у звичайних умовах шахтної підземної розробки, необхідно відрізнити безпосередню й основну покрівлю. Під безпосередньою покрівлею необхідно розуміти той шар породи, який під дією температури більше чи менше оплавився і змістився у вигазований простір, утворивши канал газифікації. Усі верхні породи можна віднести до основної покрівлі. Породи основної покрівлі тільки у нижній частині можуть одержувати термічні зміни, а верхні шари матимуть тільки деформаційні зміни під дією гравітації.

Одним з головних завдань підземної газифікації є збереження каналу газифікації та забезпечення в ньому найбільш сприятливих умов для протікання процесу СПГВ. В умовах газифікації вугільних пластів збереження каналу газифікації залежить не тільки від самого протікання процесу газифікації, але й від поведінки порід покрівлі у вогневому просторі, а точніше, від нашого уміння прилаштовувати процес газифікації до тих фізико-хімічних явищ, які протікають у бічних породах навколо зони газифікації.

Для протікання процесу підземної газифікації необхідно створити зону горіння – вогневий вибій, до якого постійно надходить кисень у складі дуття і з якого постійно видаляються продукти газифікації. Газовий струмінь постійно рухається через канал газифікації на одній із бічних поверхонь якого знаходиться реакційна поверхня вугільного пласта.

Не вдаючись у сутність процесу підземної газифікації, розглянемо фізико-хімічні умови, в яких знаходиться покрівля пласта, що газифікується, і зміни в породах під дією високої температури в період газифікації.

Виходячи з досвіду роботи станцій «Підземгаз» (у колишньому СРСР) самою низькою температурою процесу газифікації вважається температура $800 - 900^{\circ}\text{C}$, при якій утворюється дуже бідний низькокалорійний газ ($2,4 - 3,2 \text{ МДж/м}^3$) майже непридатний до промислового використання. Тому для одержання газу з більш високими споживацькими властивостями необхідно проводити процес СПГВ при температурі в окислювальній зоні понад 1000°C . У відновлюваній зоні каналу газифікації температура може знижуватись до 800°C (нижче цієї температури реакція відновлення діоксиду вуглецю в монооксид вуглецю практично не відбувається [11]).

Розкриття відпрацьованих підземних газогенераторів на деяких станціях «Підземгаз» і наші експериментальні стендові дослідження показали, що найбільше прогрівання випробовують породи покрівлі. Породи підосви вугільного пласта мало підпадають під термічні деформації.

Породи покрівлі вугільного пласта Лисичанської станції «Підземгаз» прогрілась на висоту до 2 – 3 м над вугільним пластом, а безпосередня покрівля оплавилась і в деяких місцях утворились натічні форми – сталактити.

Резюмовані результати експериментальних досліджень і досвіду роботи станцій «Підземгаз» стан і поведінки гірських порід навколо каналу газифікації можна викласти у наступному вигляді.

Породний шар безпосередньої покрівлі пласта, який газифікується, постійно контактує з відкритим полум'ям і випробовує найбільше прогрівання. А верхні шари породи (основна покрівля) прогріваються тим менше, чим далі розташовані від осередку горіння. Площа поперечного перерізу каналу газифікації в основному залежить від поведінки безпосередньої покрівлі. Потужність безпосередньої покрівлі пласта знаходиться в межах $(0,2 - 1,5) m$, де m – потужність вугільного пласта. А товщина оплавленого шару породи залежить від температури у вогневому просторі, часу прогрівання породи, який залежить в основному від швидкості посування вогневого вибою, а також від тепло- та температуропровідності порід, геологічної будови, потужності пласта та наявності водоприпливів. Цей шар породи, оплавляючись, втрачає свою пружність і, набуваючи пластичність, обвалюється на підшву вигазованого перед цим вугільного пласта.

Верхні шари основної покрівлі одержують трохи менше випалювання і не оплавляються, але під дією температури розшаровуються по площинах напластування, а кожен з цих шарів розколюється поперечними тріщинами на окремі пачки неправильної конфігурації.

Основна покрівля у міру вигазовування пласта і посування вогневого вибою, не маючи точки опори в нижніх шарах, над вигорілим простором прогинається та плавно опускається на безладно обвалену безпосередню покрівлю. Обвалення безпосередньої покрівлі та плавне опускання основної покрівель відбуваються з зсувом у часі, тобто неодноразово. Внаслідок цього на межі між шарами цих покрівель утворюється порожнина, в яку можна подавати матеріал для закладання. Таке технічне рішення створює умови для зменшення просідань земної поверхні.

Таким чином, в умовах підземної газифікації порожнини вигазованого вугілля заповнюються породами верхньої товщі, внаслідок чого деформується і вся товща порід, майже до поверхні землі. А біля зони газифікації до гравітаційної деформації додаються ще і термодинамічні фактори. Тому розподіл у прошарку породи може бути визначений за формулою Фур'є [32]

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \alpha \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (8.2)$$

де α – коефіцієнт температуропровідності, який визначається за

$$\text{рівнянням } \alpha = \frac{\rho}{\gamma \cdot \varphi};$$

ρ – коефіцієнт теплопровідності породи, $\text{м}^2/\text{с}$;

γ – щільність породи, $\text{т}/\text{м}^3$;

φ – середня питома теплоємність породи, $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$;

t – температура, яка визначається у заданій точці, $^{\circ}\text{C}$;

τ – час прогріву шару породи;

x – відстань заданої точки від початкової площини прогрівання, м .

Розв'язуючи рівняння (8.2) для окремого випадку, коли в початковий період (при $t = 0$) шар породи у всій своїй масі має однакову температуру, її можна навести у вигляді

$$t = t_0 \left[1 + \frac{2 \cdot \sin(v \cdot x)}{v \cdot x + \sin(v \cdot x) \cdot \cos(v \cdot x)} \cdot l - atv^2 \cdot \cos(v \cdot x) \right], \quad (8.3)$$

де t_0 – температура в каналі газифікації;

v – критерій, який вводять при інтегруванні та визначають по спеціальних таблицях [32].

На базі рішення рівняння (8.3) викреслюють криву зростання температури в різній середній площині породного шару, який залягає паралельно до нижньої поверхні породи, що стикається з відкритим полум'ям.

Якщо прийняти постійно деяку потужність прошарку породи, який оплавляється, то на верхній найбільш віддаленій від відкритого полум'я площини цього шару при одних і тих же умовах температура буде тим вища, чим вища температура у каналі газифікації.

Відкладаючи по осі абсцис час, а по осі ординат температуру на верхній поверхні шару покрівлі, що оплавляється, можна побудувати криві зростання температури на верхній межі оплавленого шару залежно від початкової температури у каналі газифікації.

При дослідженні поведінки гірських порід безпосередньої покрівлі у зоні газифікації необхідно розглядати три основні фактори в будові порід. До них відносяться головні породоутворюючі елементи, механічні домішки, які були включені в період гороутворення і наявності метаморфізації гірської породи внаслідок таких геологічних еволюцій і діяльності підземних вод і газів.

При гомогенних (однорідних) породах їх фізичний стан в умовах газифікації пластів визначається законами зміни породоутворюючих елементів і теорією фізичної хімії силікатів [33, 34].

Як відомо, присутність механічних домішок не дозволяє поширити результати досліджень одного зразка на весь прилеглий породний масив. Дослідження породи у цьому випадку, мабуть, необхідно вести не тільки для всієї її маси, але й окремо виявляти теплові характеристики макроскопічних різновидів. В процесі вивчення результатів термодинамічного метаморфізму необхідно виявляти вплив цих домішок на основну породу. Має також інтерес вивчення сумісного впливу гірського тиску і високих температур на ці породи.

Теплова дія відкритого полум'я на породи покрівлі викликає зміну породоутворюючих компонентів Al_2O_3 і SiO_2 , метаморфізація яких дуже різноманітна.

Глинясті породи містять у собі кремнезем у декількох модифікаціях: у вигляді елемента глин $Al_2O_3 \rightarrow \dots \rightarrow 2 SiO_2 \cdot 2H_2O$ (каолініт) і у вигляді пісковикових домішок кремнеземистого піску SiO_2 .

Присутність кремнезему у породі впливає на характер його поведінки в умовах процесу підземної газифікації вугілля: до $575^\circ C$ утворюється β – кварц, в інтервалі температур $575 - 870^\circ C$ – α – кварц; $870 - 1470^\circ C$ – α – тридиміт, від $1470^\circ C$ і вище (розплав) – α – кристобаліт.

У гірських породах кремнезем звичайно зустрічається у вигляді β – кварцу, інші компоненти є наслідком термодинамічної переробки вихідного матеріалу кремнезему.

Поліморфні модифікації безводного кремнезему можна навести у вигляді діаграми (рис. 8.7).

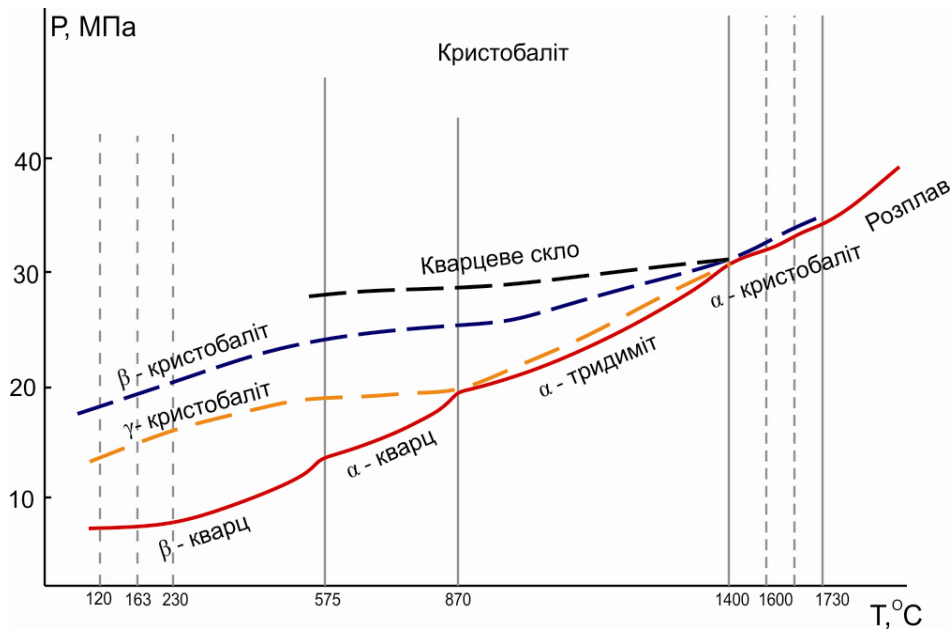


Рис. 8.7. Ідеальна $p - t$ діаграма для системи SiO_2

Перетворення кварцової модифікації з α у β відбувається швидко і не вимагає перегрівання чи переохолодження, тоді як трансформація $\alpha_{\text{кварц}} \leftrightarrow \alpha_{\text{тридиміт}} \leftrightarrow \alpha_{\text{кристобаліт}}$ відбувається повільно.

Термічне перетворення кремнезему з однієї кристалічної структури в іншу звичайно супроводжується змінами об'єму, що впливає на загальну монолітність гірського масиву породи в процесі її нагрівання над вогневим простором.

Розширення кремнезему для різних кристалічних модифікацій відрізняються (рис. 8.8).

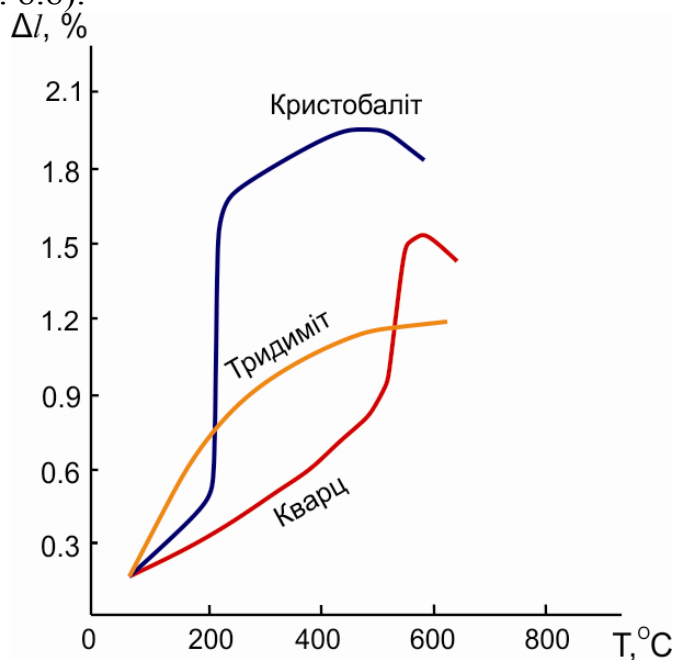


Рис. 8.8. Графіки залежності лінійного розширення кристобаліту, тридиміту і кварцу від температури (у процентах від початкової довжини Δl)

Під дією високої температури кремнезем не тільки переходять з однієї кристалічної структури в іншу, змінюючи при цьому свій об'єм залежно від швидкості зміни температури, але й одночасно відбувається порушення зв'язків зерен кремнезему з рештою породного масиву, що призводить до руйнування цих порід. Вони розтріскуються на окремі куски (луски) великої чи малої величини.

Реверс газодуттєвих потоків при підземній газифікації може викликати швидку зміну температури у породах безпосередньої покрівлі вугільного пласта. Внаслідок цього породи можуть руйнуватись від зміни температури. Щоб уникнути цих негативних наслідків необхідно запровадити на поверхні підігрів дуття приблизно до температури 300 – 500° С.

Руйнування кварцу при коливанні температури буває особливо значним під час різких і швидких змін теплового стану кремнеземистого з'єднання.

Другим основним компонентом порід безпосередньої покрівлі, який підлягає температурним дослідженням, може бути Al_2O_3 – глинистий компонент, що являє собою осілу цементувальну масу глинистих, глинистий пісковик і піщанистий сланець. Дуже часто глинистий цемент зустрічається в піщаниках, вапняках і інших породах.

Виходячи з експериментальних досліджень процес термічної деформації у глинах і їх похідні може бути наведений наступним чином.

Після видалення природної вологи, яка закінчується при температурі 160 – 170° С, починається повільне видалення хімічно пов'язаної води. Видалення вологи з породи супроводжується зменшенням її об'єму та стисканням плівки на глинистій породі. Особливо ясно це спостерігається при термічній обробці гончарних і керамічних глин.

Втрати хімічно пов'язаної вологи у породі закінчуються при температурі до 600° С, причому ця волога видаляється не поступово і рівномірно, а зразу і в вузькому інтервалі температур 470 – 600° С. При цьому усадка глинистої маси закінчується при температурі 220 – 270° С, а зі зростанням температури починає розширюватись до температур 510 – 600° С.

Досить показовою термічною характеристикою глинистих речовин є температурна крива нагрівання глин.

Так при нагріванні каоліну при температурі 560° С відбувається загальмовування у підйомі температури, а при досягненні нагріву до 1000° С відбувається різкий підйом температури у товщі зразка каоліну (рис. 8.9).

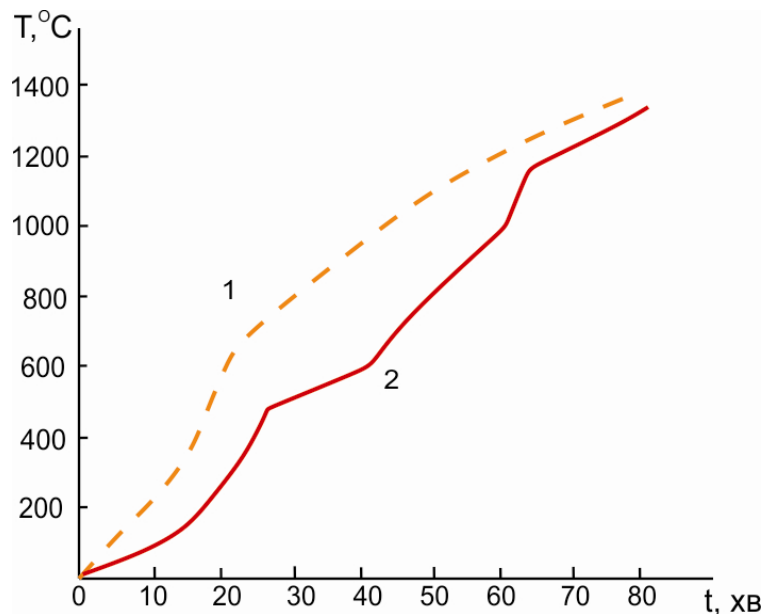


Рис.8.9. Графіки залежності нагрівання зразка каоліну від температури:
1 – температурна крива печі; 2 – температурна крива каоліну

Загальмовування зростання температурної кривої 2 при 560° С залежить, можливо, від наявності ендотермічних реакцій у глинах. А вище 1000° С відбувається прискорене прогрівання каоліну і в тому числі й інших глин, цей процес пов'язаний, можливо, з екзотермічними реакціями, що проходять в інтервалі температур 1000 – 1180° С.

Деякі глини, і в тому числі ряд порід сланців, мають відмінні від вказаних температурні інтервали ендотермічних і екзотермічних реакцій, але повторюваність зламів температурних кривих властива усім взагалі глинам і їх похідним.

Різкий злам інтервалу ендотермічних реакцій пов'язаний з початком високотемпературної усадки глин, яка розпочинається при 500 – 600° С і має місце при структурному переході глинистої речовини з одного стану в інший.

Екзотермічні реакції в інтервалі температур 950 – 1100° С залежать від реакцій переходу глинозему з однієї модифікації (γ – глинозем) в другу (α – глинозем). Одночасно з цими реакціями глинозем, з'єднуючись з кремнієвою кислотою, утворює нові структурні з'єднання типу силіманіт і муліт.

Під час газифікації вугільних пластів використовуючи діаграми рівноважного стану компонентів гірської породи, можна теоретично розглядати стан більш чи менш однорідних компонентів порід перед початком оплавлення і в період самого плавлення породи.

Для аналізу поведінки породи, яка складена з двокомпонентної системи $Al_2O_3 - SiO_2$, що не має домішок і включень інших елементів і з приблизно рівномірним розподілом речовини у породному масиві, можна використати діаграму для рівноважного стану породної системи $Al_2O_3 - SiO_2$ (рис. 8.10).

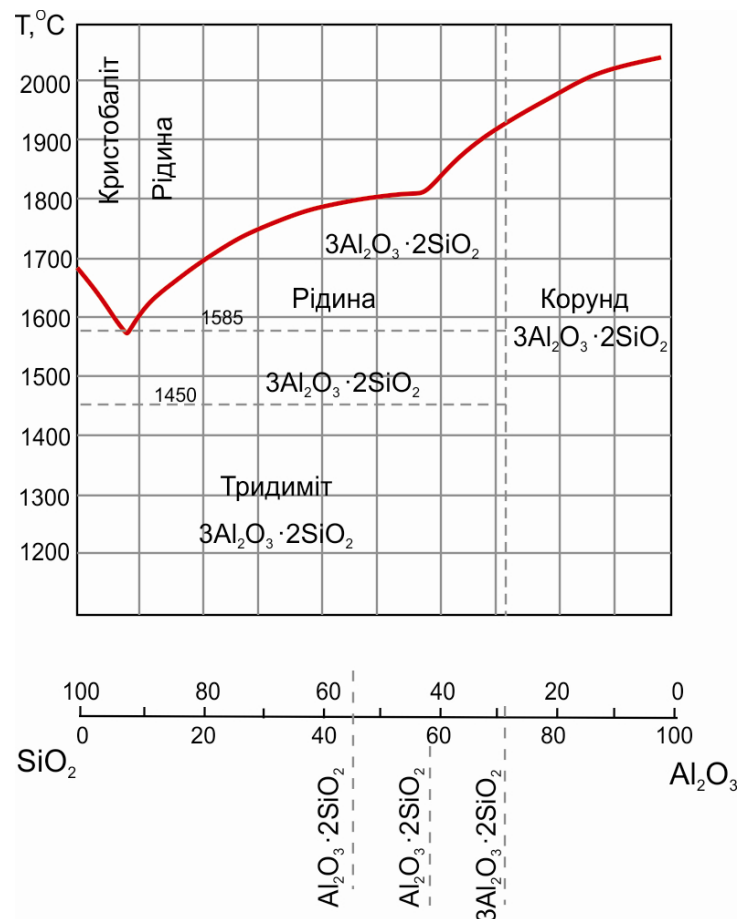


Рис. 8.10. Діаграма системи $Al_2O_3 - SiO_2$

Згідно діаграми евтектична точка плавлення породного масиву лежить при температурі $1555 \pm 6^\circ C$. Але температури плавлення кожного з цих компонентів зокрема знаходяться вище: для $SiO_2 - 1700^\circ C$, $Al_2O_3 - 2060^\circ C$.

Початково взаємодіють 5,5% Al_2O_3 і 94,5 % SiO_2 і взаємно утворюють розплав, який заповнює порожнечі між твердим скелетом породи. Якщо склад елементів у породі наближається до евтектичного, то, мабуть, породний масив може повністю оплавитись навіть при евтектичній температурі $1555 \pm 6^\circ C$, причому стан опалвлення у цьому випадку залежатиме від часу, тобто $Q -$ кількість опалвленої речовини в одиниці породного масиву буде дорівнювати $Q_{1555} = f(t)$.

При зниженні чи підвищенні концентрації Al_2O_3 в окремих місцях породного масиву кількість речовини, яка трансформується в цих місцях у розплавлений стан, відповідно зменшиться, незважаючи на те, що навіть і при тривалому періоді прогрівання породного масиву все ж збережеться частина твердої речовини у вигляді скелета.

Цей скелет у подальшому буде опалвуватися тільки зі зростанням температури всередині породного масиву.

Збільшення концентрації Al_2O_3 до 57 % і відповідно зменшення вмісту SiO_2 до 42 % призводить до повного розплавлення при температурі $1800^\circ C$ (див. рис. 8.7).

Приймаючи за основу у породному масиві Al_2O_3 і нехтуючи наявністю кремнезему (після опалвлення його залишається мало у породі), можна

встановити вміст твердого скелета в евтектичній точці плавлення за формулою (у процентах від початкового об'єму)

$$Al_2O_3 - 5,5 \cdot \frac{SiO_2}{94,5}, \quad (8.4)$$

де Al_2O_3 – вміст глинистих частинок у породному масиві, %;

SiO_2 – також для кремнезему, %.

З виразу (8.2) бачимо, що при заданій евтектичній точці частково Al_2O_3 й особливо Al_2O_3 трансформується в рідкий стан і не може протидіяти зовнішнім навантаженням через втрати своєї міцності та пружності.

Подальші структурні зміни твердої та рідкої фаз можуть бути визначені з діаграм рівноважних станів Al_2O_3 і SiO_2 , враховуючи, що при повільному нагріванні досліджуваної точки породного масиву, теоретично можна вважати, що плавлення вибраної ділянки породного масиву буде відбуватись за рівноважною програмою системи $Al_2O_3 - SiO_2$ (див. рис. 8.10).

При дуже повільному нагріванні зразка породи (наприклад, куба) і залежно від вмісту у ньому Al_2O_3 і температури наявність в ньому твердої фази виходячи з діаграми (див. рис. 8.10) може характеризуватись графіком кривої (рис. 8.11).

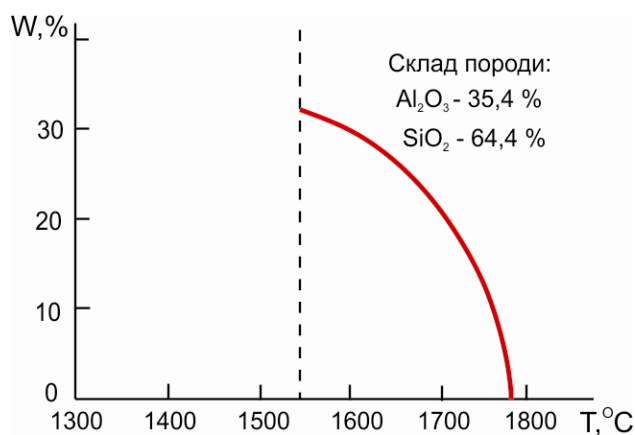


Рис. 8.11. Графік залежності вмісту твердої фази (W) у процентах від початкового об'єму і температури (t) нагрівання зразка породи

З цього графіка бачимо, що при досягненні температури 1560°C у момент початку оплавлення вміст твердої фази зменшується до 35 % і далі у міру зростання температури до $1750 - 1800^\circ\text{C}$ кількість твердої фази практично наближається до нуля.

На базі цієї кривої можна зробити висновок, що чим більше у породному масиві Al_2O_3 тим повільніше і при високій температурі відбувається оплавлення породи. Рідка фаза розплавленої породи складена в основному з $3 Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2$, а тверда фаза до температури 1800°C має в собі муліт і кристобаліт.

Мулліт має непостійний хімічний склад від $Al_6 SiO_{13}$ до $Al_4 SiO_8$ (або від $3 Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2$ до $2 Al_2O_3 \cdot SiO_2$). Кристобаліт же являє собою ряд мінеральних видів поліморфної модифікації двоокису кремнію.

При підвищенні температури понад 1800°C в рідинну фазу перетворюється і муліт, а залишкова тверда фаза породи трансформується у корунд.

За наявності у породі покрівлі вугільного пласта вапняку зі значними домішками породи розплавлення породи відбувається у відповідності з рівноважною діаграмою системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ (рис. 8.12).

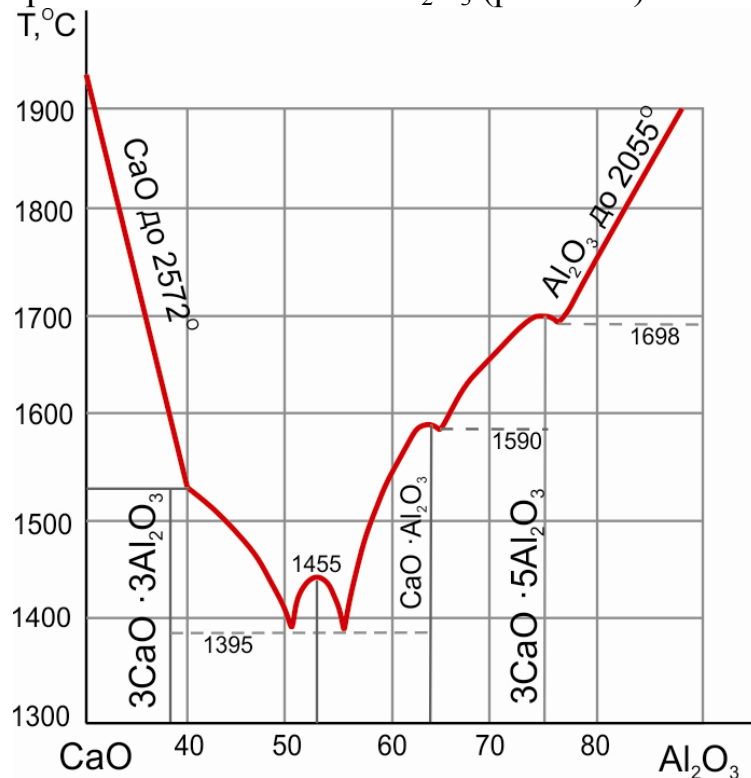


Рис. 8.12. Діаграма системи $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$

Відомо [48], що перед розплавленням з цієї породи дисоціюють вуглекислі з'єднання за реакцією



Наявність у покрівлі вугільного пласта, що газифікують, такої породи може супроводжуватись після дисоціації вуглекислих з'єднань механічним руйнуванням. Відшаровувані частинки дисоційованого вапняку у вигляді CaO легко відриваються газодуттєвим потоком у каналі газифікації і виносяться з вогневого вибою. Внаслідок цього в окремих місцях покрівлі можуть утворюватись вивали вапняку з появою куполів, що призводить до завалів і утворення пробок у каналі газифікації.

Як бачимо з діаграми (див. рис. 8.12), породна система починає оплавлятися при досягненні температури 1395 – 1400° С при вмісті Al_2O_3 до 55 %. За аналогією з попереднім для такої системи також можна установити вміст твердої фази у розплавленій масі дисоційованої породи, а, якщо ввести додатковий коефіцієнт на наявність у породі CO_2 , можна визначити наявність твердих частин і в початковому породному масиві.

Залежно від температури розплавлена рідка маса змінює свій хімічний склад. Так, на початку порода має $5 \text{ CaO} \cdot 3 \text{ Al}_2\text{O}_3$, потім хімічний склад змінюється до $3 \text{ CaO} \cdot 5 \text{ Al}_2\text{O}_3$, при цьому вміст Al_2O_3 може ще більше зростати.

Наявність глинозему (Al_2O_3) у породі підвищує її вогнетривкі властивості. А присутність у породі кисневих з'єднань CaO , FeO , MgO , MnO й ін., навпаки, знижує температуру плавлення і тим більше, якщо вміст у породі цих з'єднань більший.

Для приблизних розрахунків можна уявити, що добавлення 1 % одного з цих з'єднань знижує температуру плавлення породи приблизно на 15 – 25°C, при цьому необхідно відзначити, що ці окисли по різному впливають на температуру плавлення.

Температура плавлення гірських порід може бути визначена за емпіричною формулою [35]

$$T = \frac{360 + Al_2O_3 - RO}{0,228}, \quad (8.4)$$

де T – температура плавлення породи, °C;

Al_2O_3 – вміст глинистої породи, %;

RO – вміст кисневих з'єднань у породній масі, %.

Формула(8.4) використовується при вмісті у породі глинистих домішок Al_2O_3 у межах 20 – 25 %.

Наявність в гірських породах кисневих з'єднань є наслідком міграції підземних вод. Звичайно ці окисли розміщуються в масиві породи нерівномірно. Так, залізисті відкладення (колчедан, пірит) розміщуються в породах покрівлі вугільного пласта окремими гніздами. А $CaCO_3$ проникає звичайно у тріщини та порожнини.

Наявність у породах покрівлі відкладень кисневмісних з'єднань викликає у процесі підземної газифікації передчасне виплавлення окремих компонентів, які, стікаючи по реакційній поверхні горіння вогневого вибою, утруднюють процес газифікації вугільних пластів.

Разом з тим, рівномірне розташування у породі кисневмісних домішок не повинно утруднювати процес газифікації, але за умови: якщо під впливом цих домішок порода покрівлі не перетвориться в легкоплавку масу, що неспроможна зберігати свою стійкість при температурі 1000 – 1200° C.

Більшість порід покрівлі вугільних пластів вміщують місцеві скупчення кремнезему і глини, які у випадку розплавлення можуть бути охарактеризовані рівноважною діаграмою стану породоутворюючих компонентів. Тому наявність, наприклад, звичайної глини, чи глинистого сланцю, складеного з $CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 2 SiO_2$, у місцях, де знаходяться компоненти кремнезему, створює умови для початку плавлення породи вже при температурі біля $1360 \pm 5^\circ C$ (рис. 8.13).

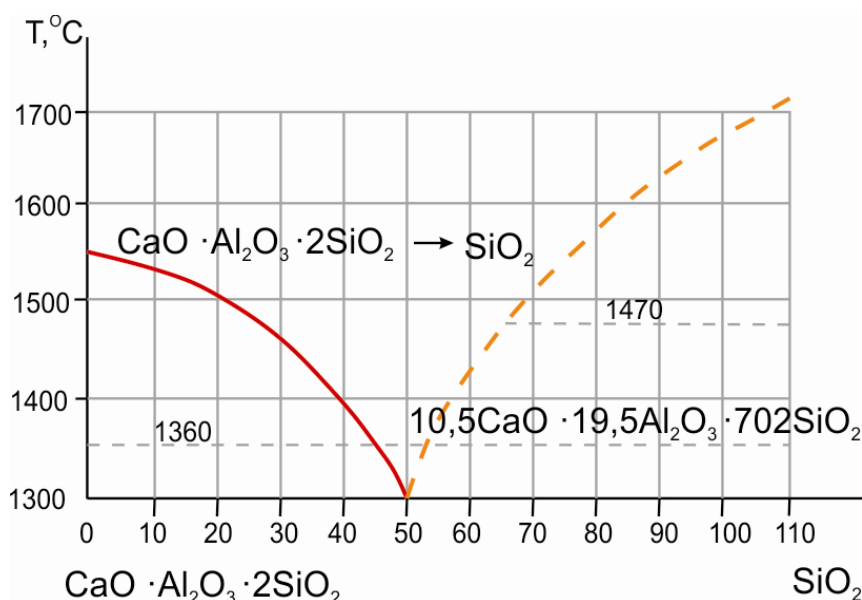


Рис. 8.13. Діаграма стану кремнезему і глинистого сланцю під дією температури

По цій діаграмі можна визначити кількість твердої речовини у породі, що оплавляється, яка визначає механічну міцність порід при високій температурі.

У вапнякових і вапняково-глинистих породах основними породоутворюючими компонентами є Al_2O_3 , SiO_2 , $CaCO_3$. У процесі цієї породи $CaCO_3$ розкладається на CaO і CO_2 , тобто у цьому випадку породоутворюючими компонентами будуть CaO , Al_2O_3 і SiO_2 . Рівноважний стан цієї породної системи визначається відомою трикутною діаграмою для трикомпонентних порід [46]. Користуючись діаграмою можна визначити кількість твердої фази породи в оплавленій масі при підземній газифікації вугілля. Маються діаграми і для інших компонентів, які можуть вміститись в породах покрівлі вугільного пласта.

8.10. Сучасні уявлення про стан порід покрівлі при підземній газифікації твердого палива

Проведені термодинамічні дослідження стану порід покрівлі вугільних пластів показали, що під час першого підсушування шари гірських порід починають скорочувати свої розміри (об'єм). Внаслідок цього відбувається розшарування масиву на окремі прошарки. Зі зростанням температури у породі вище точки випаровування води розшарування збільшується як за рахунок скорочення розмірів у результаті випаровування води, так і під руйнівною дією пари. З цього виходить, що вже на самому початку процесу газифікації вугільних пластів породи покрівлі розшаровуються і між окремими шарами породи з'являються порожнини, які порушують суцільність породного масиву.

Ендогенні реакції при 500 – 600° С на діаграмі викликають зсув кривої вправо, тим більший, чим більше міститься у породному масиві глинистих компонентів. А екзогенні процеси під дією зовнішніх джерел енергії викликають різкий стрибок температури вгору.

Реакції дисоціації $CaCO_3$ й інших вуглекислих з'єднань також вимагають витрат тепла, внаслідок чого при температурі 350 – 550° С можливі зсуви кривої вправо через втрати тепла на дисоціацію вуглекислих з'єднань.

Найбільш прогрітим поверхням шару породи відповідає найбільша ступінь оплавлення породи. За потужністю безпосередньої покрівлі температура зменшується у міру віддалення від нижньої поверхні цього шару. Тому нижня частина шару безпосередньої покрівлі в процесі прогрівання менш здатна протистояти механічним деформаціям, ніж верхня, більш віддалена від вогневого простору.

Виходячи з вищенаведеного, для підвищення стійкості порід основної покрівлі, необхідно застосовувати закладку порожнин між основною і безпосередньою покрівлями [23].

Вивчаючи стан завислої над вогневим простором породної консолі безпосередньої покрівлі, можна констатувати, що на нижній шар цієї консолі діє стиск, а на верхню частину – розтяг. А оскільки нижня частина шару породи вже втратила свою пружність і міцність, то шар породи покрівлі, згинаючись, має нейтральну площину трохи вище середньої площини шару, внаслідок чого порода одержує уширення за потужністю у нижній частині вигнутого шару. З цього випливає, що верхня поверхня шару безпосередньої покрівлі може одержати незначне подовження, а нижня – може випробовувати значний стиск під дією власної ваги.

Крива згину прошарку породи безпосередньої покрівлі в основному буде залежати від прогрівання породи і нейтрального шару, розташування якого буде залежати від наявності твердого скелету породи під час її оплавлення у поперечному перерізі згинного шару.

Породи покрівлі крутого падіння пластів вже у природних умовах наближаються до вертикального положення і тому не одержуватимуть великих пластичних деформацій при вигині.

На пологих пластах оплавлений шар породи безпосередньої покрівлі при вигині має значні пластичні деформації. Тому для дуже пологих пластів необхідно мати більш високе прогрівання породи безпосередньої покрівлі для досягнення її плавного опускання.

Становить значний інтерес залежність між потужністю оплавленого шару породи покрівлі та потужністю газифікованого пласта. Зі зростанням потужності вугільного пласта збільшується і потужність оплавленого шару породи безпосередньої покрівлі, якщо, звичайно, порода покрівлі не розшаровується на дрібні частинки, які ускладнюють теплопередачу й оплавлення породи.

Наявність у покрівлі потужного вугільного пласта тонкого і легко відшаровуваного шару породи останній, оплавляючись в умовах достатнього прогрівання, зависає у вертикальному положенні й, одержуючи пластичні подовження, зазвичай розривається, падаючи на підшву пласта.

Для керування процесом газифікації вугільних пластів необхідно знати основні характеристики порід покрівлі газифікованого вугільного пласта. В першу чергу мають бути увазі такі породи покрівлі: глинистий сланець, вапняк (в умовах Львівсько-Волинського і Донецького басейнів) і сланцювата глина (в умовах Дніпровського буровугільного басейну).

Покрівля вугільного пласта – глинистий сланець.

Потужність пласта 1,1 м, кут підосви 4°. У покрівлі пласта залягає глинистий сланець з прошарками пісковика потужністю 5,3 м, а вище – масив шарів породи з глинистих і піщаних сланців, прошарків вугілля і вапняку.

Підосва пласта – піщанистий сланець потужністю 4,12 м, а нижче – масив породи з піщано-глинистих і глинистих сланців, пісковика, прошарків вугілля і вапняку.

На базі проведених досліджень можна констатувати наступну картину поведінки покрівлі в період посування вогневого вибою.

Динаміка діяння температури на породи покрівлі вугільного пласта у вогневому просторі дозволяє чітко розмежувати три стадії.

На першій стадії вугільний пласт безпосередньо під покрівлею ще не почав активно горіти, але породи покрівлі трохи прогрілись від теплоти, що розповсюджується від вогневого вибою, внаслідок теплопровідності порід. Ця стадія характеризується віддачею вологи, яка міститься у глинистому сланці покрівлі, і зростанням тріщинуватості сланцю. Тріщини, що утворилися, в основному мікроскопічної та капілярної. Під час форсованого горіння і посування вогневого вибою тріщинуватість порід зростає.

Друга стадія характеризується вигорянням вугілля та відслоненням порід покрівлі. Остання починає одержувати теплоту не тільки за рахунок теплопровідності, але й за рахунок безпосереднього конвективного теплообміну (випромінювання розпечених газів).

У результаті інтенсивного виділення вологи (якщо сушіння ще не закінчилось до моменту відслонення покрівлі) деяка частина товщі порід відшаровується і супроводжується відскакуванням дрібних лусок сланцю. Значна частина породних лусок падає у канал газифікації, решта виноситься газом через газовідвідні свердловини, сприяючи їх засміченню. Чим краще висушений сланець у першій стадії, тим з меншою інтенсивністю відбувається відскакування сланцевих лусок і тому з меншою вірогідністю відбувається засмічування газовідвідних свердловин.

Зі зростанням температури у вогневому просторі на поверхні порід покрівлі відбуваються наступні зміни:

- при температурі 280 – 300° С з'являються тріщини в основному на площинах напластування сланцюватості;
- при 1000 – 1100° С – інтенсивне розшарування породи, починаючи з поверхні, яка повернута до відкритого полум'я;
- понад 1100° С – розм'якшення окремих пластинок на поверхні та їх відскакування;
- при температурі 1100 – 1200° С – оплавлення нижньої поверхні, стікання оплавленої породи краплями і утворення сталактитів;
- при температурі 1200 – 1300° С – інтенсивне оплавлення і витікання розплавленої маси.

Одночасно з цими явищами у товщі порід покрівлі, починаючи знизу догори, утворюються зони розплавлення, розшарування, розтріскування, сушіння, природного стану породи.

Потужність кожної з цих зон залежить від температурного режиму у вогневому вибої. Як показали експериментальні дослідження, породи покрівлі

пластів n_7^H “Сокальський”, n_7 і n_8^6 Волинського родовища характеризуються неглибоким проникненням зони розплавлення.

На другій стадії відбуваються наступні зміни розмірів каналу газифікації:

- у період інтенсивного просушування відбувається відскакування сланцюватих лусок, частково винесених газовим потоком з каналу. Це явище сприяє зростанню поперечного перерізу каналу газифікації. Одночасно з цим продовжується розшарування і розтріскування нижньої поверхні безпосередньої покрівлі;
- під час інтенсивного розплавлення зростає поперечний переріз каналу за рахунок стікання розплавленої маси безпосередньої покрівлі. Розплавлена маса, стікаючи на підшову каналу, зменшує його переріз. На крутоспадних пластах розплав стікає у вигазований простір і змішується там з вугільною золою, яка знаходиться частково в рідкому і напіврідкому стані. Охолоджуючись, ця маса твердіє і слугує природним закладним матеріалом у вигазованому просторі.

На пологих пластах зола і розплавлена маса концентруються на підшві каналу газифікації та частково заповнює нижню частину пласта, утрудняючи його газифікацію.

Розкриття підземних газогенераторів Лисичанської і Шатської станцій «Підземгаз» після завершення газифікації показали, що в глинистих сланцях зі значним вмістом вуглистої речовини, які характеризуються інтенсивним плавленням при незначному поглибленні зони плавлення в товщу породи, утворюються завислі на покрівлі досить в'язкі сталактити, вершина яких часто досягає підшви пласта. Після охолодження сталактити перетворюються в досить тверді стовпи, які стають кріпленням покрівлі у вигазованому просторі, зменшуючи процес просідання і обвалення породи покрівлі. Наявність сталактитів може сприяти також утворенню обвідних каналів, знижуючи при цьому ефективність СПГВ.

Підшовою пластів n_7^H і n_8^6 є піщанистий сланець. За аналогією з нашими експериментальними дослідженнями піщанистого сланцю ця підшва під впливом вогневого простору випинається і сприяє зменшенню поперечного перерізу каналу газифікації.

Виходячи з вищевикладеного, можна констатувати, що одночасно зі зростанням поперечного перерізу каналу під дією температури (відскакування лусочок, розшарування й оплавлення сланцю, вигорання вугільного пласта) спостерігається низка явищ, які впливають на зменшення поперечного перерізу каналу: розшарування і розтріскування породи покрівлі, яке супроводжується випинанням, заповненням каналу розплавом сланцю, золою і шлаками, випинанням підшви.

На цій основі є можливим такий стан, коли зменшення перерізу каналу газифікації внаслідок випинання покрівлі та підшви і заповнення каналу розплавом і шлаками повністю компенсує те приращення перерізу каналу, яке утворюється в результаті вигазовування вугілля і розплавлення покрівлі. Таке приращення досить благотворно вплине на процес СПГВ, оскільки тут зводиться до мінімуму від'ємна дія обвалення породи.

Третя стадія характеризується тим, що вогневий вибій внаслідок постійного посування відійшов від якогось фіксованого місця настільки, що кількість теплової енергії, яку одержує безпосередня покрівля зменшується. У цей період відбувається вирівнювання в одержанні та віддачі теплоти. Пізніше кількість теплоти, яка віддається поверхнею покрівлі, починає переважати над кількістю одержаної. З цього моменту породи покрівлі починають остигати. Одночасно відбувається остигання розплавленої породної маси і зольного залишку, який виділився з покрівлі. Розплавлений шар твердіє і набуває високої міцності. На розкритих газогенераторах міцність застиглої розплавленої маси склала 10 – 40 МПа. Ця маса має досить неоднорідний склад, її міцність залежить від ступеня виплавлення різних компонентів, пористості, ступеня остекління, яке залежить, в свою чергу, від режиму застигання.

Окрім температури на стійкість порід покрівлі впливає ще гірський тиск верхньої товщі порід.

Через порушення рівноважного стану гірських порід під впливом газифікації вугілля і термодинамічної дії на породи покрівлі та підосви каналу газифікації напруження у прилеглому масиві зростають. Як тільки величина цих напружень переважить опір порід, відбуваються обвалення, які проходять у різних варіаціях. Результати обвалень додаються до результатів температурних змін.

Для створення сприятливих умов, при яких процес СПГВ буде проходити ефективно; – необхідно забезпечити обвалення порід покрівлі не біля самої лінії вогневого вибою, а на деякій відстані, щоб частина каналу, яка безпосередньо прилягає до вугільного пласта, залишалась незаваленою (вільною):

- розміри вільної частини каналу повинні відповідати розрахунковому поперечному перерізу, який визначається за умови пропуску необхідної кількості газодуттєвого потоку;
- у вигазованому просторі не повинні утворюватись обвідні (додаткові) канали, по яких частина дуття проходить і не бере участі у процесі газифікації вугілля;
- при недодержанні наведених вище умов необхідно застосовувати закладання вигазованого простору.

Недодержання цих умов призводить до погіршення процесу СПГВ. При цьому може відбуватись припинення газифікації внаслідок завалу чи зашлакування вогневого простору, погіршуються споживацькі властивості (теплотворна здатність) генераторного газу через великий чи дуже малий поперечний переріз каналу газифікації, бо в обох випадках кількість і співвідношення газодуттєвих потоків, які беруть участь у процесі горіння, відповідатимуть розрахунковим даним, вигоряння вугільного пласта відбудеться не на повну потужність, оскільки нижня пачка пласта біля підосви зашлакується, як це мало місце при розкритті дослідних газогенераторів на Лисичанській станції «Підземгаз»; можливе викривлення лінії вогневого вибою, що може призвести до зупинки процесу газифікації вугільних пластів.

На основі цих міркувань, можливо, необхідно навчитись керувати процесом газифікації шляхом застосування направленого дуття, використання

пересувної точки подачі дуття, реверсу газодуттєвих потоків, щоб осередок горіння рівномірно пересувався на всьому дзеркалі горіння і на цій базі значно покращити ефективність СПГВ [10].

Покрівля вугільного пласта – вапняк

Як приклад візьмемо вугільний пласт C_6 Західнодонбаського родовища. У покрівлі пласта залягає вапняк потужністю 1,95 м, вище нього розташований глинистий сланець потужністю 3,9 м і ще вище залягає піщанистий сланець потужністю 9,9 м.

У підшві вугільного пласта залягає піщанистий сланець потужністю 2,2 м, нижче його розташовується піщаник з домішками сланцю.

Як наведено раніше, були проведені дослідження характеру поведінки безпосередньої покрівлі – вапняку стосовно до трьох стадій підземної газифікації:

- 1) стадія прогрівання породи покрівлі при газифікації вугільного пласта;
- 2) стадія безпосереднього стискання розпалених газів з породами покрівлі;
- 3) стадія охолодження породи покрівлі після віддалення вперед вогневого вибою.

Перша стадія. Безпосередня покрівля пласта C_6 – вапняк до початку газифікації мала значну тріщинуватість. Внаслідок прогрівання вапняку тріщинуватість зросла. Одночасно з цим відбувається підсушування й осадження мінеральних солей з підземних вод з утворенням кальциту.

Під час інтенсивного посування вогневого вибою відбувається форсований розвиток тріщиноутворення. Дослідження показали, що тріщини направлені головним чином перпендикулярно площинам напластування. У результаті цього в період газифікації можливе обвалення з покрівлі окремих шматків вапняку у вигляді неправильних форм трикутного чи трапецієвидного перерізу.

Друга стадія. Термодинамічна дія вогневого простору і розпалених газів призводить до зростання розтріскування вапняку:

- на деякому температурному інтервалі після спікання вапняку термічна деформація його приблизно відповідає термічній деформації глинистого сланцю;
- у вапняковій покрівлі відбувається дисоціація вапняку й утворення у покрівлі над вогневим простором зони вапна CaO . Ця зона структурно відмінна від масиву вапняку, при цьому збільшення її потужності зростає з підвищенням температури. Тому на деяких ділянках вогневого простору, де температура вища, зона дисоціації вапняку покрівлі може бути значно глибшою.

Дисоційований шар вапняку має неоднакову міцність, як це з'ясовано експериментальними дослідженнями, залежно від температури випалювання. Чим вища температура випалювання, тим міцніше дисоційований шар.

Досить важливо відзначити співвідношення між потужностями дисоційованої та недисоційованої зон. За цим співвідношенням можна відзначити, наскільки змінилась механічна міцність шару вапняку, який являє собою безпосередню покрівлю вугільного пласта.

Якщо звернутись до нашого прикладу, то на базі шахтного видобутку можна вважати, що шар вапняку потужністю 1,95 м є достатньо стійкою і міцною безпосередньою покрівлею, що здатна не обвалюватись при значному відслоненні. Однак при частковій дисоціації вапняк може втрачати свою стійкість.

Залягаючи вище вапняку глинистий і піщанистий сланці зі зростанням напруженості температурного поля також розпочинають розтріскуватись і тому мають тенденцію до розширення об'єму породи, що обумовлює появу додаткового навантаження на початкову покрівлю вапняку.

До кінця другої стадії порода покрівлі каналу газифікації вже розбита крупними тріщинами, які направлені в основному перпендикулярно площинам напластування, і при цьому дисоційована на деяку глибину. Глибина дисоційованого шару і міцність його нерівномірні. У цих умовах можливі вивали найбільш слабких ділянок.

Третя стадія. У дисоційованому вапняку в процесі охолодження відбуваються такі зміни:

- внаслідок нерівномірного охолодження зростає кількість тріщин, які знижують міцність і стійкість покрівлі;
- під час зниження температури породи до 350 – 450° С розпочинається гідратація у дисоційованому вапняку, яка призводить до подальшої втрати міцності та стійкості вапнякової покрівлі.

Наведені експериментальні дослідження підтверджують, що швидкість гідратації на різних ділянках породи покрівлі неоднакова. У місцях, де дисоціація вапняку відбувалась при високій температурі, гідратація проходить з невеликою швидкістю у порівнянні з місцями, де дисоціація відбувалась при низькій температурі. Прискорення гідратації має місце і за наявності парів підземних вод.

Виходячи з вищенаведеного бачимо, що фізичні зміни породи покрівлі у третій стадії ведуть до утворення тріщинуватості та розбиванню на велику кількість неоднакових за механічним опором ділянок, які значно послаблюють міцнісні властивості порід. Чим тонкіший шар вапняку, тим більше виникає вивалів і обвалень. Зі зростанням відслонення покрівлі, яке пов'язано з посуванням вогневого вибою, прогресивно зростає дія гірського тиску, внаслідок чого збільшуються гравітаційні деформації та відбувається повне обвалення порід.

Таким чином, у вигазованому просторі на межі вогневого вибою утворюються наступні зони:

- без обвалення породи;
- часткових обвалень;
- повного обвалення.

Для створення ефективного процесу підземної газифікації необхідно, щоб ці зони, починаючи від лінії вогневого вибою, повільно і послідовно переходили одна в другу.

Покрівля вугільного пласта – сланцювата глина.

Прикладом залягання вугільного пласта під сланцюватою глиною є буре вугілля марки Б₁ Дніпровського буровугільного басейну. Потужність вугільного пласта 3,5 м, горизонтальне залягання.

Для виконання нормального процесу підземної газифікації високо зольного вугілля досить важливою є поведінка золи при вигазовуванні пласта, утворення фільтраційної зони у каналі газифікації.

У цих умовах необхідно розглядати два періоди процесу газифікації. Перша стадія – це розпалювання вугільного пласта і початок посування вогневого вибою від лінії розпалювання. Друга стадія – період стабільного руху вогневого вибою.

На першій стадії під час розпалювання вугільного пласта глина покрівлі буде проходити всі термічні зміни: видалення вологи, розширення і усадки породи. Надалі будуть відбуватись явища, які супроводжують випалення: поява тріщин розшарування, випинання. При досягненні температури 1300 – 1400° С відбувається розм'якшення і прогин породи безпосередньої покрівлі.

Необхідно відзначити, що на початку газифікації після розпалювання покрівля здатна витримати деякий час гірський тиск. Якщо обвалення покрівлі відбудеться, то завал не буде повним; випалений шар розсиплеться при обваленні на окремі плити, достатньо широкі для того, щоб під ними зберігався канал газифікації для проходження повітря (дуття).

Друга стадія розпочинається після розпалювання інтенсивного процесу вигазовування пласта. Під час швидкого підвищення температури у вугіллі в ньому форсовано поширюється пористість. Залишений після вигазовування пласта зольний скелет займає трохи менший об'єм, ніж початковий об'єм незгасифікованого вугілля. Тому у каналі газифікації високо зольних бурих вугінь Дніпровського басейну відбувається фільтраційний процес горіння вугілля, тобто гази проходять наскрізь зольний скелет.

У фільтраційному каналі газифікації за наявності скелета порушення рівноваги порід покрівлі значно менші ніж при вигазовуванні у відкритому каналі. Тому хід процесу СПГВ відбувається більш рівномірним і стійким.

Однак особливістю Дніпровського буровугільного родовища є те, що швидкі порушення режиму газифікації можуть призвести до нерівномірного обвалення покрівлі та до порушення фільтраційного каналу. Нерівномірне осідання може викликати прорив у вогневий простір підземних вод верхніх і нижніх водоносних горизонтів. При рівномірному посуванні фільтраційного каналу прорив води ледве можливий, бо повне спікання глини у покрівлі пласта утворює захисну зону від проникнення води у канал газифікації. У протилежному ж випадку необхідно застосувати закладку виробленого простору, що також ізолює доступ води через глинисту запечену покрівлю, яка буде повільно без руйнувань опускатись на закладний масив.

На основі експериментальних досліджень можна вважати сприятливим для ведення процесу газифікації у гірничо-геологічних умовах, за аналогією до умов Дніпропетровського буровугільного басейну, додержання таких вимог:

– під час запуску підземного газогенератора – розпалюванні вугільного пласта – необхідно добиватися максимального прогрівання і високого рівня випалення порід покрівлі. Такий режим газифікації підвищує міцність і стійкість покрівлі, яка не обвалюється деякий проміжок часу після вигазовування початкового об'єму вугільного пласта.

У подальшому, з віддаленням фільтраційного каналу і зростанням прогину незакріпленої покрівлі, канал заповнюється обваленими породами, але вже до цього часу завал фільтраційного каналу не загрожує процесу ПГВ.

– Процес підземної газифікації бажано проводити при високій температурі для утворення захисної оболонки з запеченої глини, яка оберігає вогневий простір від проривання підземних вод.

– Режим газифікації має бути стійким без зупинок дуття чи значного зменшення концентрації кисню у дутті, бо зниження температури у вогневому вибої може призвести до порушення захисної запеченої глинистої корки і проривання підземних вод у вогневий простір.

Із вищенаведених міркувань можна зробити наступні висновки.

Запропоновані сучасні уявлення установлюють послідовність фізико-хімічних змін порід покрівлі залежно від температури, гірського тиску і посування лінії вогневого вибою, а також вплив цих змін на стан каналу газифікації.

Виходячи з установлених в першому наближенні залежностей між температурою у вогневому вибої та міцнісними властивостями гірських порід, можна уявити, як відіб'ється зростання чи зниження температури у вогневому просторі на формі поперечного перерізу каналу газифікації.

Виходячи з цього, зростання чи зниження температури у вогневому просторі сприятиме зміні умов газифікації у каналі в бажаному для процесу СПГВ напрямку.

Досвід роботи радянських станцій «Підземгаз» свідчить, що співставлення показань приладів на поверхні землі, які реєструють кількість, склад, тиск, температуру дуття, що нагнітають у газогенератор і одержання газу, дають можливість своєчасно робити більш-менш певні припущення про деякі явища, які відбуваються у каналі газифікації (обвалення порід покрівлі, непомірне розширення чи звуження каналу тощо). Залежно від цих припущень можна шляхом збільшення чи зменшення температури впливати у бажаному напрямку на стан каналу газифікації.

Температура у вогневому просторі може бути легко змінена відповідним варіюванням кількості та складу дуття. Само собою розуміється, що зміна має бути пов'язана з режимом самого процесу СПГВ. Іноді можна піти на тимчасове погіршення калорійності газу, якщо це призведе до виправлення недоліків самого каналу і, тим самим, до покращення у подальшому процесу газифікації.

Зазначені вище уявлення зводяться до наступного.

Під час газифікації необхідно організувати ретельне спостереження показань реєструючих приладів і аналіз результатів цих спостережень з точки зору їх зв'язку зі станом каналу газифікації. У разі відхилень повинні прийматися відповідні заходи для виправлення стану каналу газифікації шляхом підвищення чи зниження температури в каналі.

Результати змін, виражених у показаннях приладів, повинні реєструватись у журналах. На цій основі може бути накопичений практичний досвід і науковий матеріал для подальшої розробки проблеми керування покрівлею при підземній газифікації вугілля.

ВИСНОВКИ

У підручнику узагальнено матеріали з фізико-хімічних і геологічних аспектів геотехнології. Геотехнологічний спосіб розробки родовищ дозволяє різними методами видобування і переробки корисних копалин перетворювати їх у рухливий стан за допомогою застосування на місці їх залягання в надрах теплових, масообмінних, хімічних, гідродинамічних процесів, які дозволяють виконувати процес видобування і видачу корисної копалини з надр через свердловини.

Виходячи з названого принципу, можна виділити три основні напрями у вивченні геотехнічних методів видобування:

- вивчення самого перетворення фізичного і хімічного характеру (установлення природи процесу і послідовності проходження окремих стадій);
- вивчення впливу фізико-геологічного стану і гірського середовища на процес перетворення корисної копалини у рухомий стан (наприклад, газ);
- дослідження ефективних засобів здійснення процесів видобування.

З наведеного ясно, що фізико-хімічні, геологічні та термодинамічні характеристики родовищ дають можливість рекомендувати вибір оптимальних технологічних схем, процесів і засобів видобування корисних копалин методами підземного вилуговування, розчинення, виплавки, свердловинного видобування, газифікації вугільних пластів.

Останніми роками особливу гостроту набула проблема охорони навколишнього середовища. Зростаючі шкідливі викиди у повітряний басейн, які утворюються при горінні органічного палива, спонукають до розробки нових безвідходних технологій у промисловості й енергетиці. Підземна газифікація вугілля здатна вирішити ці й інші завдання одночасно за допомогою термодинамічних процесів.

У підручнику наведено основні закони і розрахункові співвідношення термодинаміки стосовно до реальних процесів газифікації вугільних пластів, які ілюструються прикладами розрахунків при вирішенні завдань енергетики в гірничій справі. В сьогодення тепло- і масообмін, агрегатні та фазові перетворення у мінералах і породах при тепловій дії, окислювально-відновні процеси з виділенням тепла є супутніми процесами видобування і переробки твердих копалин. З розвитком геотехнологічних методів розробки родовищ і зростання вимог до якості гірської сировини теплові процеси з часом будуть переходити з розряду супутніх у розряд чисто технологічних.

Методи досліджень і контролю не тільки дозволяють якісно вирішувати основні практичні завдання гірничого виробництва, але й забезпечують розвиток гірничої науки в області пізнання фізики термодинамічних процесів, які відбуваються у зоні та поблизу вогневого вибою при газифікації вугільних пластів. Тільки користуючись найбільш сучасними методами дослідження, можна виявити нові, раніше невідомі закономірності в гірських породах і мінералах і на їх основі створювати нові геотехнологічні методи видобутку корисних копалин, керування гірським тиском і термодинамічними явищами.

Детальне вивчення фізичних властивостей гірських порід дає можливість науково прогнозувати послідовність фізико-хімічних змін порід покрівлі залежно від температури, гірського тиску і посування вогневого простору.

У книзі наведено дані про пружні деформаційні, міцнісні, електричні, теплові та магнітні властивості мінералів, магматичних і метаморфічних порід при високих тисках і температурі.

Розвиток фізико-хімічних процесів у термодинамічних умовах характеризується диференціацією питань, що вирішуються, а також поглибленням в область фізичної суті, які відбуваються у гірських породах, з однієї сторони, і розглядом гірських порід як складних геологічних об'єктів, взаємодія яких визначає їх поведінку – з другої.

Зараз увага дослідників спрямована на вивчення гірських порід не тільки як відносно однорідних, ізольованих твердих тіл (зразків), але і як елементів гірського масиву у природних умовах.

Актуальності набувають також дослідження гірських порід, які вже знаходяться під термодинамічним впливом у процесі газифікації вугільних пластів і деформацією порід при зсуванні гірських порід під час ведення вогневих робіт.

Досвід підземної газифікації в Україні, теоретичні й експериментальні дослідження дозволяють сформулювати перспективні напрями розвитку і підвищення ефективності СПГВ, а саме:

- розкриття і підготовка вугільних пластів похилими чи похило-горизонтальними свердловинами;
- використання у свердловинах гнучких металевих трубопроводів для подавання дуття у підземний газогенератор;
- застосування комбінованого дуття (повітря, пари, діоксиду вуглецю, кисню);
- відпрацювання запасів твердого палива (сланцю, вугілля тощо) спареними газогенераторами;
- використання реверсивного та пульсуючого дуття;
- застосування процесу газифікації під тиском газодуттєвих потоків, особливо при розробці пластів на великих глибинах;
- використання електромагнітних полів для намагнічування газодуттєвих потоків;
- застосування ін'єкційного закладання вигазованого простору;
- застосування для виробництва теплової й електричної енергії агрегатів з вільнопоршневими двигунами, парогенераторами; акумулювання теплової енергії з проміжними теплоносіями, теплонасосними установками і теплообмінниками на теплових трубах.

Недалеко той час, коли гірник, також як лікар який не може встановити діагноз хвороби без досконального обстеження людини, буде приймати рішення на основі повної інформації про властивості гірських порід, стан і термодинамічні процеси у масиві на досліджуваній ділянці і в межах відповідного регіону чи родовища.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фізико-хімічна геотехнологія / [Табаченко М.М., Владико О.Б., Хоменко О.Е., Мальцев Д.В.]. – Д.: НГУ, 2012. – 310 с.
2. Фізико-хімічні методи видобування корисних копалин. Задачник у прикладах і розв'язках / [Табаченко М.М., Бузило В.І., Дичковський Р.О., Фальштинський В.С.]. – Д.: НГУ, 2012. – 112 с.
3. Ельчанинов Е.А. Проблемы управления термодинамическими процессами в зоне влияния горных работ / Е.А. Ельчанинов – М.: Наука, 1989. – 240 с.
4. Дмитриев А.П. Термодинамические процессы в горных породах / А.П. Дмитриев, С.А. Гончаров. – М.: Недра, 1983. – 359 с.
5. Кирилин В.О. Технічна термодинаміка / В.О. Кирилин, В.В. Сичов, О.Е. Шейдлін. – М.: Энергоатомвидавництво, 1983. – 359 с.
6. Марморштейн П.М. Петрофизические свойства осадочный пород при высоких давлениях и температурах / П.М. Марморштейн. – М.: Недра, 1978. – 191 с.
7. Рыкалин Н.Н. Высокотемпературные технологические процессы. Теплофизические основы / Рыкалин Н.Н., Углов А.П., Анищенко Л.М. – М.: Наука, 1985. – 173 с.
8. Колоколов О.В. Математические алгоритмы термохимической геотехнологии / Колоколов О.В., Эйшинский А.М., Микенберг А.М. – Д.: НГУ, 1992. – 217 с.
9. Теплофизические аспекты освоения ресурсов недр / [Аренс В.Ж., Дмитриев А.П., Дядькин Ю.Д. и др.]. – Ленинград: Недра, 1988. – 337 с.
10. Куддусов Х.К. Исследования физических свойств минерального вещества Земли при высоких термодинамических параметрах / Х.К. Куддасов. – К.: Наук. думка, 1977. – 319 с.
11. Теория и практика термохимической технологии добычи и переработки угля / [Колоколов О.В., Табаченко Н.М., Эйшинский А.М. и др.]. – Д.: НГАУ, 2000. – 281 с.
12. Разработка нефтяных месторождений наклонно-направленными скважинами / [Евченко В.С., Захарченко Н.П., Коган Я.М. и др.]. – М.: Недра, 1986. – 279 с.
13. Забигаило В.Е. Физико-химические методы управления состоянием угольно-породного массива / Забигаило В.Е., Васючков Ю.Ф., Ренка В.В. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.
14. Черняев В.И. Расчет напряжений и смещений пород при разработке свиты пластов / В.И. Черняев. – К.: Техніка, 1987. – 148 с.
15. Зборщик М.П. Охрана выработок глубоких шахт в выработанном пространстве / М.П. Зборщик. – К.: Техніка, 1978. – 175 с.
16. Посыльный Ю.В. Анализ параметров процесса сдвижения земной поверхности над горными выработками угольных шахт: Обзор / Ю.В. Посыльный. – М.: ЦНИЭИуголь, 1983. – 41 с.

17. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / под ред. Н.В. Мельникова, В.В. Ржевского, М.М. Протодяконова. – М.: Недра, 1975. – 421 с.
18. Александров М.М. Силы сопротивления при движении труб в скважине / М.М. Александров. – М.: Недра, 1978. – 321 с.
19. Дмитриев А.П. Физические свойства горных пород при высоких температурах / А.П. Дмитриев. – М.: Недра, 1969. – 311 с.
20. Ржевский В.В. Ультразвуковой контроль и исследования в горном деле / В.В. Ржевский, В.С. Ямщиков. – М.: Недра, 1968. – 351 с.
21. Ржевский В.В. Классификация и паспортизация горных пород по их физическим свойствам / В.В. Ржевский. – М.: Недра, 1968. – 227 с.
22. Справочник по физическим свойствам минералов и горных пород при высоких термодинамических параметрах / под ред. М.П. Воляровича. – М.: Недра, 1978. – 293 с.
23. Фальштинський В.С. Удосконалення технології свердловинної підземної газифікації вугілля: монографія / В.С. Фальштинський. – Д.: НГУ, 2009. – 131 с.
24. Табаченко Н.М. Реверсный эффект дутья при подземной газификации углей / Н.М. Табаченко // Уголь Украины. – 2009. – № 10. – С. 8 – 11.
25. Табаченко Н.М. Пульсационный эффект дутья при подземной газификации угольных пластов / Н.М. Табаченко // Уголь Украины. – 2007. – № 3. – С. 3 – 8.
26. Лялько В.И. Исследование процессов переноса тепла и вещества в земной коре / В.И. Лялько, М.М. Митник. – К.: Наук. думка, 1978. – 150 с.
27. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А.Ф. Чудновский. – М.: Физматгиз, 1962. – 455 с.
28. Любимова Е.А. О теплопроводности черных пород при повышенных температуре и давлении в водо- и нефтенасыщенном состоянии / Е.А. Любимов, А.И. Масленников, Ю.А. Ганиев // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. – 1979. – № 5. – с. 87 – 93.
29. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика / М.Х. Карапетьянц. – М.: Химия, 1985. – 417 с.
30. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, М.Д. Михайлов. – Госэнергоиздат, 1963. – 279 с.
31. Лебедев Т.С. Проблемы термобарических исследований физических свойств минерального вещества литосферы / Т.С. Лебедев // Геофиз. журнал. – 1985. – № 6, т. 7. – С. 62 – 82.
32. Филимонов Ю.П. Топливо и печи / Ю.П. Филимонов, Н.С. Громова. – М.: Металургія, 1987. – 320 с.
33. Торопов Н.А. Диаграммы состояния силикатных систем / Торопов Н.А., Барзаковский В.П. – Л.: Наука, 1972. – 448 с.
34. Волков Л.Ф. Механика твердого тела / Л.Ф. Волков, А.А Фальштынський. – М.: Наука, 1980. – 367 с.
35. Балкевич В.Л. Термическая керамика / В.Л. Балкевич. – М.: Стройиздат, 1984. – 257 с.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. ХАРАКТЕРИСТИКА ГЕОТЕХНОЛОГІЧНИХ МЕТОДІВ РОЗРОБКИ КОРИСНИХ КОПАЛИН.....	6
2. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА	12
2.1. Основні закони термодинаміки	12
2.2. Теплопередача в твердих тілах і газах	25
2.3. Термічні напруження в гірських породах	28
2.4. Теплове розширення.....	30
2.5. Вплив теплового поля	31
2.6. Вплив тиску на гірські породи.....	40
3. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПІДЗЕМНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ	48
3.1. Сутність розкриття родовищ твердих горючих копалин.....	48
3.2. Властивості вугілля як сировини для підземної газифікації.....	51
3.3. Розподіл температури по довжині каналу вогневого вибою	52
3.4. Техніко-економічні параметри каналу вогневого вибою	54
3.5. Технологія одержання штучного генераторного газу	55
3.6. Функціональна структура підприємства підземної газифікації вугілля.....	57
4. СУЧАСНА КОГЕНЕРАЦІЙНА ГЕОТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБЛЕННЯ ГЕНЕРАТОРНОГО....	61
4.1. Комбіноване вироблення штучного газу	61
5. ОСНОВНІ СХЕМИ ФОРМУВАННЯ ОБЛАСТІ ПОВНИХ ЗРУШЕНЬ І ПРОЯВІВ ТИСКУ ТОВЩІ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ ВЕДЕННІ ПРОЦЕСІВ ГАЗИФІКАЦІЇ.....	73
5.1. Формування зон зрушень гірських порід	73
5.2. Напружений стан у товщі гірських порід	80
5.3. Деформації гірських порід при високій термічній температурі.....	81
6. ФІЗИКО-ТЕХНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТА ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В	84
6.1. Будова і склад мінералів і гірських порід	84
6.2. Фізико-технічні властивості порід	85
6.3. Дія зовнішніх полів на властивості гірських порід	87
6.4. Механічні властивості гірських порід.....	87
7. УМОВИ І ХАРАКТЕР ПРОЯВІВ ГІРСЬКОГО ТИСКУ В НАДРАХ ЗЕМЛІ	89
7.1. Зміна характеристик і параметрів гірської породи	89
7.2. Процеси зрушення гірських порід під час газифікації.....	92
7.3. Геомеханічні процеси під час газифікації вугільних пластів	99
7.4. Особливості утворення температурних зон навколо вогневого вибою	103
7.5. Контроль і керування тепловою аномалією в період газифікації вугілля.....	111
8. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ ГІРСЬКИХ ПОРІД	118
8.1. Фізичний стан речовини	118
8.2. Поведінка покрівлі та підшви вугільного пласта в термодинамічних умовах	122
8.3. Температурні дослідження стану порід покрівлі вугільного пласта p_7^H “Сокальський”.....	123
8.4. Температурні випробування стану порід покрівлі вугільного пласта p_8^H Волинського родовища	128

8.5. Температурні випробування стану породи покрівлі вугільного пласта π_7 Волинського родовища	130
8.6. Температурні випробування стану породи покрівлі Семенівсько-олександрійського родовища Дніпровського буровугільного басейну	132
8.7. Температурні дослідження стану породи покрівлі вугільного пласта C_6 Західнодонбаського родовища	133
8.8. Температурні дослідження стану порід покрівлі вугільного пласта C_5 Західнодонбаського родовища	134
8.9. Теоретичні узагальнення експериментальних даних поведінки бічних порід у термодинамічних процесах газифікації вугілля.....	135
8.10. Сучасні уявлення про стан порід покрівлі при підземній газифікації твердого палива	145
 ВИСНОВКИ	 154
 СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	 156

Навчальне видання

Дичковський Роман Омелянович
Табаченко Микола Михайлович
Фальштинський Володимир Сергійович

**ЗМІНИ ГІРСЬКОГО МАСИВУ
ПРИ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ГЕОТЕХНОЛОГІЯХ
ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГІЛЛЯ**

Підручник

Друкується у редакційній обробці авторів.

Підп. до друку 02.11.2015. Формат 30х42/4.
Папір офсетний. Ризографія. Ум. друк. арк. 8,9.
Обл.-вид. арк. 8,9. Тираж 25 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано
у Державному вищому навчальному закладі
«Національний гірничий університет».
Свідectво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06. 2004.
49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.